



TITLE:

油圧シヨベルの最適設計に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

安国, 明

CITATION:

安国, 明. 油圧シヨベルの最適設計に関する研究. 京都大学, 1989, 工学博士

ISSUE DATE:

1989-09-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k4382>

RIGHT:

油圧シヨベルの最適設計に関する研究

平成元年 5 月

安 国 明

油圧ショベルの最適設計に関する研究

平成元年 5 月

安 国 明

目 次

第 1 章	序 論	1
1 - 1	概 説	1
1 - 2	本研究の目的	2
1 - 3	本研究の内容	2
	参考文献	3
第 2 章	土の掘削機構に関する従来の研究	4
2 - 1	概 説	4
2 - 2	掘削装置型式と主なパラメータ	5
2 - 3	掘削装置にかかる力	6
2 - 3 - 1	掘削時刃面にかかる力	6
2 - 3 - 2	すくい角と掘削抵抗	8
2 - 4	掘削抵抗解析の方法	8
2 - 5	むすび	20
	参考文献	22
第 3 章	土の比掘削抵抗 R_s に関する考察	23
3 - 1	概 説	23
3 - 2	土の比掘削抵抗	23
3 - 3	比掘削抵抗 R_s 測定方法	24
3 - 4	比掘削抵抗 R_s と土の力学定数との関係	25
3 - 4 - 1	畠の研究	25
3 - 4 - 2	実験目的と内容	27
3 - 4 - 3	実験試料, 試料の常数および力学的特性	29
3 - 4 - 4	実験結果および考察	30
	1) R_s と ρ_d との関係	30

2) R_s と q_c との関係	31
3) R_s と C_u との関係	32
3-5 結論	34
参考文献	36
第4章 油圧式シヨベルの掘削実験装置および計測システム	37
4-1 概説	37
4-2 本研究用掘削実験装置製作の目的	38
4-3 本研究用掘削実験装置の構造	39
4-4 計測システム	41
参考文献	43
第5章 砂の掘削抵抗に関する実験結果，考察および解析	44
5-1 概説	44
5-2 実験方法	44
5-2-1 実験研究内容	44
5-2-2 実験用試料	45
5-2-3 掘削装置（バケット）の寸法	46
5-2-4 実験方法	47
5-3 バケットにかかる抵抗	47
5-4 実験結果および考察	48
5-4-1 掘削抵抗の切線成分 F_t と法線抵抗 F_n	49
5-4-2 掘削抵抗と掘削深さとの関係	51
5-4-3 掘削抵抗と掘削速度との関係	52
5-4-4 掘削抵抗と爪数との関係	53
5-4-5 掘削抵抗と爪形との関係	56
5-4-6 掘削抵抗の方向および着力点の位置	57
5-5 土と鋼板との摩擦実験	59

5-5-1	実験の目的	59
5-5-2	実験方法	59
5-5-3	実験結果および検討	60
5-6	掘削抵抗の解析	61
5-7	バケット寸法の選択	66
5-8	実際の油圧シリンダとの対応	70
5-9	結論	71
	参考文献	73
第6章	粘性土の掘削抵抗に関する実験結果，考察および解析	74
6-1	概説	74
6-2	実験方法	74
6-2-1	実験研究内容	74
6-2-2	実験用試料	75
6-2-3	掘削装置（バケット）の寸法	76
6-2-4	実験方法	76
6-3	実験結果および考察	77
6-3-1	掘削抵抗の切線成分 F_t と法線抵抗 F_n	77
6-3-2	掘削抵抗と掘削深さとの関係	80
6-3-3	掘削抵抗と爪数との関係	80
6-3-4	掘削抵抗と爪形との関係	83
6-3-5	掘削抵抗の方向および着力点の位置	84
6-4	土と鋼板との摩擦実験	85
6-4-1	実験の目的	85
6-4-2	実験方法	85
6-4-3	実験結果および検討	85
6-5	垂直貫入実験	87
6-5-1	実験方法	87

6-5-2	実験結果	88
6-6	掘削抵抗の解析	88
6-7	バケット寸法の選択	92
6-8	実際の油圧シヨベルとの対応	93
6-8	結論	94
	参考文献	96
第7章	油圧シヨベル掘削時における運動機構解析	97
7-1	概説	97
7-2	掘削力	97
7-2-1	掘削力発揮の条件	98
7-2-2	最大掘削力の表わす方法	100
7-3	アタッチメントの各機構の主なパラメータの計算方法	102
7-3-1	バケット機構	103
7-3-2	アーム機構	106
7-3-3	ブーム機構	108
(1)	ブーム持上げ機構要素の確定	108
(2)	適当パラメータの計算	112
7-4	合理的掘削方法	114
7-4-1	掘削方法	114
7-4-2	三種類の掘削方法の比較	116
7-5	結論	116
	参考文献	118
第8章	結論	119

謝 辭	126
-----	-----

付表 1	127
------	-----

付表 2	128
------	-----

第1章 序 論

1-1 概説

油圧式ショベルは機械式ショベルから開発されたものである。最初の油圧式ショベルは1951年フランスのPoclain社によって製作された。その後1954年に西ドイツのDemag社、1955年に西ドイツのLiebherr社および1959年に西ドイツOrenstein-Koppel社が油圧式ショベルを設計、製作した。日本はほぼ1961年前後各会社が外国の油圧式ショベルを導入して製作した。当初の10年間にはバケット容量は0.3～0.4 m³級を中心に発達し、次第に0.6～0.7 m³級の普及をみた。その後、昭和46(1971)年頃から1.0～1.5 m³、昭和50年代では2.0～3.0 m³級が開発され普及している。さらに、最近では40 m³級のローディングショベルも開発されている。

一方、日本国においては近年の経済と技術の高度成長に伴う建設労働力の不足、労働意識の変化、労務費の高騰などにより小規模作業も機械化による省力化が叫ばれ、小型機およびミニ型機が急テンポで普及してきた。また、大規模工事の経済的処理、工期の短縮、大きなリーチや強い掘削力の要請などにより、ますます大型化の傾向にある。現在、1986年においては日本国の油圧ショベル生産量は約57,195台が製作されて、建設機械生産量の24%を占めており¹⁾、世界一といわれている。

油圧ショベルは土砂を相手に掘削作業を行うのであるが、その作業条件はそれぞれの現場で非常に異っている。図1-1は中型の油圧ショベルがどのような土質を対象に掘削作業を行っているか、ということ进行调查した結果である。

これによれば、泥沼でのしゅんせつ作業という超軟弱土の掘削作業から、硬岩を相手にする作業まで、幅広い土質を相手にして作業をしていることがわかる。これらの千差万別の作業条件に対応できるように、

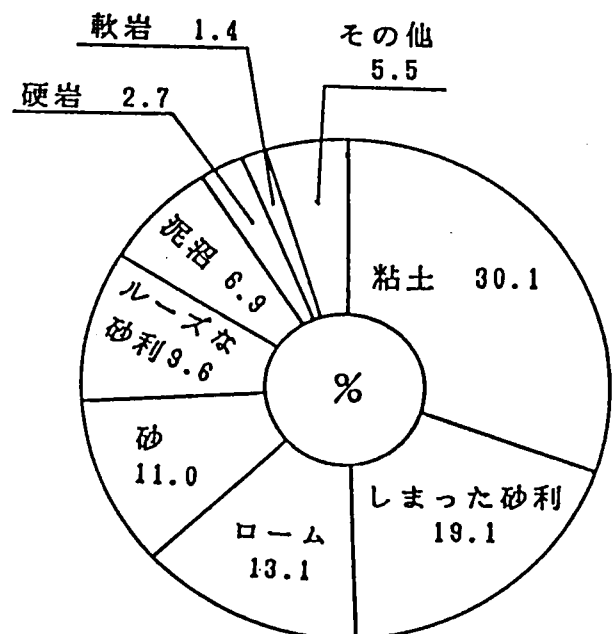


図1-1 油圧ショベルの作業条件

油圧ショベルはその爪先力で代表される掘削力ができるだけ作業条件に適當するように設計，製作される。しかし，実際の油圧ショベルの設計に当たっては従来使われている機械の模倣によるか，単なる思いつきまたは，経験のみによっており，「土」そのものを考えていないのが実情である。この現状によると，「優れた油圧ショベルを世に送出す」ということの保証はどこにあるのか。土砂を除いて，外力（掘削抵抗）を考えていない設計は適當であるのか。今日，最も重要かつ切実な問題であると考えらる。

1-2 本研究の目的

油圧ショベルとしては，経験による方法は各各の場合についてそれぞれ多数の実験と数10年間の経験を要し，その経験以外の場合についてはよりよい油圧ショベルを設計，製作することができない。本研究においては，従来の油圧ショベル設計に「土」を考慮していないものが多いことに対して，砂質土，粘性土を対象として，掘削抵抗特性を解明，把握し，さらに，それによって油圧ショベルの機構およびリンク機構の最適寸法などを決定して，油圧ショベルの最適設計，合理的掘削方法などに関する指針を与えることを目的とし，その目的達成のために次のような研究を行った。

1-3 本研究の内容

前節で述べたように，現在の油圧ショベル設計には，大きな問題点がある。本論文では油圧ショベル最適設計に関する研究を行ったが，その内容について簡単に述べると以下のようなものである。

第2章においては，まず土の掘削過程中的土の掘削パターンおよび掘削時刃面にかかる力について，一般的に略述する。その後，土の掘削抵抗解析に関する，従来の研究成果を整理している。最初に，土の掘削抵抗解析法により分類し，土圧論的考え方および実験的方法に2つ大別し，それぞれについて概説している。さらに，従来の土の掘削抵抗解析方法について比較検討を行っている。

第3章においては，掘削抵抗解析方法の中の実験的方法として，土に固有の掘削抵抗指数いわゆる土の比掘削抵抗 R_s の測定方法について述べ，さらに，土の比掘削抵

抗 R_s と土の力学定数との関係および土質調査法としてのコーン試験，ベーン試験との関係について，種々の土に対する測定を行い，この間には夫々比例関係があることを見出した。

最後に，土の比掘削抵抗 R_s の利点について述べている。

第4章においては，本研究で，油圧ショベルの掘削抵抗を解明，把握するために新しく製作した掘削実験装置の機能および構造，それに計測システムについて詳述している。この掘削実験装置は油圧ショベル機械自体の制限を全部除いてバケットでの掘削実験内容をすべて包含するものである。

第5章および第6章においては，砂質土と粘性土を用いて，掘削条件（掘削角度，掘削深さ，掘削速度）の相違により，また，掘削装置（爪なし，爪あり，爪の本数など）の相違によって，掘削中に生じる掘削抵抗の大きさ，その方向および着力点の位置を解明，把握するために掘削実験を行った。一方，掘削抵抗を正確に把握するために，鋼板と砂質土，粘性土との摩擦抵抗を求める必要がある。その摩擦抵抗を把握するために，砂質土と粘性土について種々の鋼板の表面粗さを変えて実験を行った。さらに，掘削抵抗実験結果による実験値と本研究の掘削抵抗解析手法による理論値との比較検討を行っている。その結果，バケット容量が決められた時，最適のバケット形状を見出している。

第7章においては油圧ショベル掘削時における運動機構解析について研究を行っている。ここではまず，油圧ショベルの掘削力を表わす新しい方法を提案し，さらに，油圧ショベルアタッチメントを設計するにあたり，従来の経験計算方法を使わず，作業範囲とブーム，アーム，バケットの寸法など各機構寸法の新しい計算方法を提案した。最後に，油圧ショベルの作業効率を高めるために，合理的な掘削方法を提案している。

第8章は以上の結果をまとめて結論としている。

参 考 文 献

- 1) 日本建設機械化協会編：日本建設機械要覧、日本建設機械化協会発行，

pp 39 ~ 83, 1986 年

第2章 土の掘削機構に関する従来の研究

2-1 概説

建設機械の土の掘削に関する研究は古くから行われてきた。はじめ研究者たちは農耕用工具のすきに関する掘削抵抗について研究を行っている。その後、特に第二次世界大戦後建設事業発展に伴って建設機械についても大いに研究が行われた。

近年、土木工事規模の拡大、人件費の高騰などにより、土木工事の機械化が促進された。これに伴い油圧ショベルの需要が増大するとともに省力化、省エネルギー化、高性能化、軽量化、居住性、操作性などはもちろん高度な耐久性が要求されている。これに伴い油圧ショベル、特に、油圧ショベル構造物に関する実働負荷および疲労強度評価などについて研究されている。しかし、以上の研究内容より実際外力（掘削抵抗）把握の検討について早急に掘削機構、掘削抵抗の大きさ、方向、着力点などを把握するのはきわめて重要な意義と価値を有するものである。

土の掘削過程中に土の変形と掘削抵抗の大きさは土の性質、含水量、密度および掘削状態（掘削深さ、掘削角など）により異なるが、土の変形を分類すると、図2-1に示すように次の3つのパターンがある。a) せん断形、b) 流れ形、c) 裂断形。

a) せん断形 掘削の進行につれて刃先から斜め上方に向かって間欠的にはっきりとしたせん断線が生じる。なお、掘削を続けると、次のせん断線が更に、前方に生じている。本研究の実験を通じて、含水量4%程度の砂および30%以下の粘性土の場合がこれにあたる。

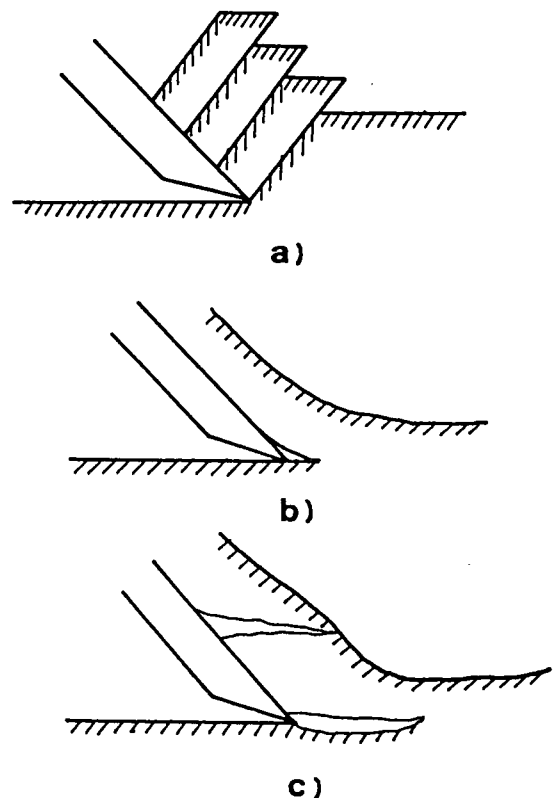


図2-1 掘削するとき土の変形

b) 流れ形 せん断形のようなはっきりとしたせん断線は生じないが，掘削の進行につれてせん断帯と呼ぶ変形が連続的に起こる。本研究の実験を通じて含水量は45%前後の粘性土に多い。

c) 裂断形 掘削の進行につれて刃先から進行方向にき裂が生じ，塊状ものになっていく。本研究の実験を通じてよく締固めた不飽和粘性土が裂断形になっていることが特徴的である。

2-2 掘削装置型式と主なパラメータ

いま，掘削装置としてはまとめてつぎの2種類に分けられる。即ち，バケット形掘削装置と平刃形掘削装置である（図2-2）。

平刃形掘削装置（図2-2 a）は掘削時ブレードで土を掘削する。掘削した土が掘削装置の前に盛り上る。その代表的な掘削機械がブルドーザである。

平刃形掘削装置の掘削抵抗に影響を及ぼす基本的な要素は

- (1) 寸法パラメータ 長さ L ，高さ H ，円弧半径 r など。
- (2) 角度パラメータ 掘削角 $\gamma + \beta$ ，刃物角 β ，すくい角 α （ γ ：にげ角）。
- (3) 爪があるか。

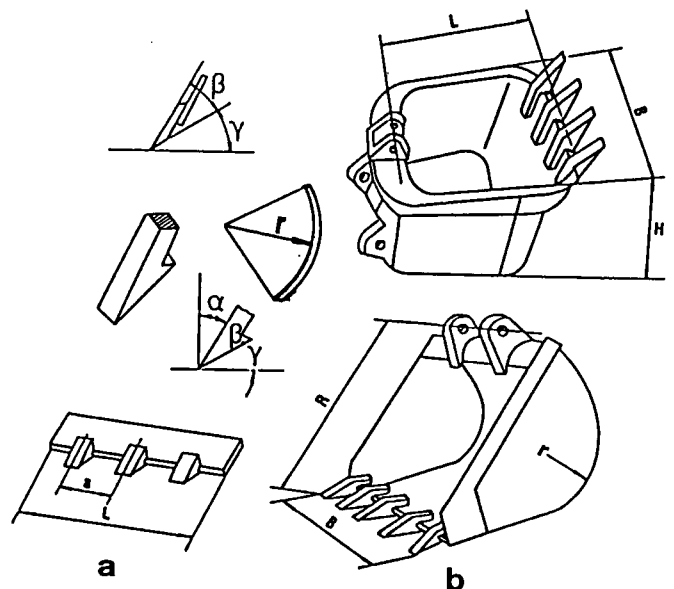


図2-2 掘削装置基本的な形

バケット掘削装置（図2-2 b）はいろいろな形のバケットである。掘削するときバケット爪（ツース）で土を掘削する。掘削した土をバケットに入れる。土がバケットに一杯になると，その土を地表面から持上げることができる。

バケット形掘削装置の掘削抵抗に影響を及ぼす基本的な要素は

- (1) 寸法パラメータ バケット容量 q ，幅 B ，高さ H および長さ L 。
- (2) 角度パラメータ 掘削角 $\gamma + \beta$ ，刃物角 β ，すくい角 α 。

(3) 爪があるか。

2-3 掘削装置にかかる力

土の掘削過程とは掘削装置と土との相互作用の過程である。大別しては2種類に分けられる。すなわち、定常掘削と非定常掘削である。定常掘削とは掘削深さが変化しない。それとは逆に非定常掘削は掘削深さが変化する。定常掘削は水平掘削ともいわれている。非定常掘削は水平掘削+垂直貫入を含んだものをともいわれている。

2-3-1 掘削時刃面にかかる力 1)2)3)4)

掘削装置の基本的な部分、刃は大体くさび形になっている。掘削装置の刃を図2-3に示す。OAをすくい面、これが進行方向に垂直な方向となす角 α をすくい角という。OCはにげ面でこれが進行方向となす角 γ をにげ角といい、 $\angle AOC$ を刃物角 β という。 $\gamma + \beta$ を掘削角と呼ぶこともある。

刃面にかかる力は刃先の鋭さにより作用力が異なる。

1) 刃先が鋭い(摩耗していない)状態

掘削するときに土が刃の作用の下にあって地表面となす角 θ にそって破壊し、それが刃面にそって上に向き移動する。刃にかかる力は法線力 N 、土と刃面との摩擦力 $T = N \tan \delta$ がある。故に、抵抗 R は N と T との合力である。掘削抵抗合力 R ともいわれる。掘削抵抗合力 R を水平、鉛直成分に分解すると、水平成分 H_α を掘削抵抗水平分力といい、鉛直成分 V_α を掘削抵抗垂直分力という。これらの幾何学的関係から求めると、次の式になる。

$$V_\alpha = H_\alpha \tan(\delta - \alpha) \quad (2-1)$$

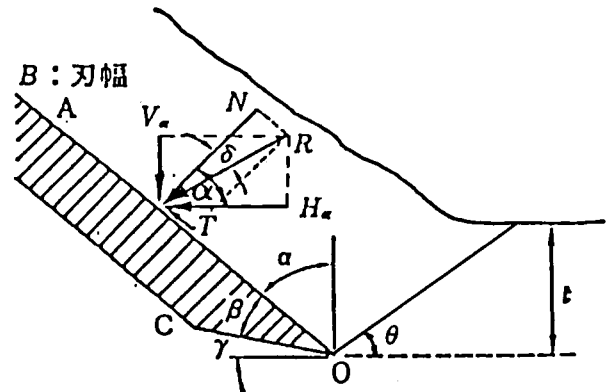


図2-3 定常掘削中の刃

2) 刃先が鈍い状態

刃先は耐摩耗鋼で作られているが、先端は使用中に摩耗して鋭度が減じる。これは図2-4のように、刃先が鈍い程接地面積が大きくなるので、同じ押込み力に対して押込み分布圧が小となり抵抗が大きくなるものと考えられる。

図2-4のごとく¹⁰⁾，Xは摩耗した爪の輪郭MEのa a線上への投影である。Zは同じ輪郭MEがa a線に垂直な線上への投影である。爪がa a線に沿って掘削すると、爪はa a線とM点で相接する。爪のE点部分は掘削した土を2つ部分に切りはなす、1つ部分は上部に押し出し、もう1つ部分はa a線の下に押す。その時掘削装置にかかる力は図2-5のごとく、掘削抵抗水平分力 H_α は

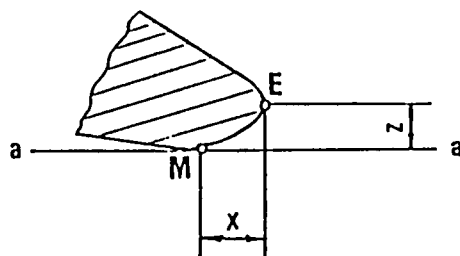


図2-4 摩耗した刃先状況

$$H_\alpha = \frac{N}{\cos \delta} \cos (\delta - \alpha) + R_1 \quad (2-2)$$

となり。掘削抵抗抵抗垂直分力 V_α は

$$V_\alpha = \frac{N}{\cos \delta} \sin (\delta - \alpha) + R_2 \quad (2-3)$$

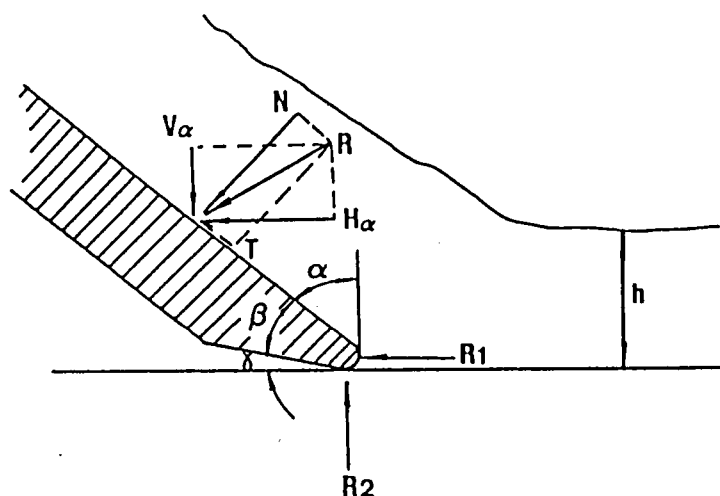


図2-5 摩耗した刃の掘削ときにかかる力

となる。

R_1 と R_2 は次の式から求める。

$$R_1 = R' (Z b + \mu_1 X b)$$

$$R_2 = R' X b + k_2 b$$

ここに b : 刃幅 (cm)

R' : 土の極限支持力 (kgf/cm²)

μ_1 : 土と鋼との摩擦係数

k_2 : 刃にかかる 1 cmあたりの土の反力 (kgf/cm)

X : 摩耗した爪の輪郭MEの $a a$ 線上への水平投影 (cm)

Z : 摩耗した爪の輪郭MEの直法線への鉛直投影 (cm)

2-3-2 すくい角と掘削抵抗

土を掘削するとき刃にかかる掘削抵抗の合成抵抗 R , 掘削抵抗水平分力 $H \alpha$, 掘削抵抗垂直分力 $V \alpha$ などの関係は (2-1) 式で表わされる。この式を検討すると

① $\alpha = 0$ (刃面が地表面に垂直) のとき

$$\tan (\delta - \alpha) = \tan \delta = \mu$$

になる, $V \alpha$ は最大掘削抵抗になる。

② $\alpha = \delta$ (すくい角が δ と同じ) のとき

$$\tan (\delta - \alpha) = 0$$

$V \alpha$ は最小掘削抵抗になる。

③ $\alpha > \delta$, $\alpha < \delta$ のとき

掘削抵抗 $V \alpha$ は大きくなる。

2-4 掘削抵抗解析の方法

土を掘削する掘削装置と土との力学はわりと新しい学問分野である。種々の土での掘削装置の性能を理論的, 解析的に予測する方法が現在強く求められている。現在, 掘削抵抗に対してよく使われている解析方法は大きく分けて2つに分けられる。即ち, 1つは土質力学の受働土圧論を用いるものであり, 他の1つは実験を通じて実

驗式を用いて掘削抵抗を推定しようとするものである。

次では掘削抵抗について従来の研究の概要を述べる。

カリョウチェキンの提案¹⁰⁾

掘削抵抗に関する計算は最初ソビエトのカリョウチェキン (В. П. К а л н о ч е к и н) である。彼は耕うん作業機のすきの実験結果にもとづいて次の計算式を提案した。

$$P_1 = \mu_1 G + k h b + \epsilon h b v^2 \quad (2-4)$$

ここに： P_1 すきにかかる水平抵抗 (kgf)

μ_1 : すきと土との摩擦係数 $\mu_1 = 0.25 \sim 0.4$

G : すき自重 (kgf)

k : 経験法により求めた土の比掘削抵抗 $K = 2000 \sim 10000 \text{ kgf/m}^2$

h : 掘削深さ $h = 0.15 \sim 0.20 \text{ m}$

b : 掘削幅 $b = 0.2 \sim 0.3 \text{ m}$

ϵ : 掘削された土が外側 (両側) 移動するときに生じる抵抗の係数

平均値 $\epsilon = 0.1 k$

V : すき移動速度 (m/sec)

以上の計算式を検討すると、すきが動くとき、その抵抗が3つ部分から構成されていることがわかる。

1つの抵抗はすきと地表面との摩擦抵抗である。この抵抗はすき重量 G 、摩擦係数 μ_1 によって異なる。

もう1つの抵抗は掘削抵抗である。この抵抗は掘削幅 b 、掘削深さ h および比掘削抵抗 k によって異なる。

他の抵抗は掘削した土を外側 (両側) に移動するときの生じる抵抗である。この抵抗は掘削断面積 $b h$ 、すき移動 (作業) 速度によって異なる。

以上の計算式には掘削装置重量、掘削断面積、掘削速度などが考えられているが、掘削角、すくい角などのようなパラメータが掘削抵抗に影響を及ぼすことを考えていなかった。一方、掘削速度の影響については掘削抵抗は一般に作業速度に比例して増加するといわれている。特に、粘性土の場合には掘削速度が大きくなるにつれて抵抗

が増大する。しかし、建設機械に対しては作業速度は低い。こうすれば建設機械作業速度は掘削抵抗に対してどの程度まで影響を及ぼすか。逆に、どの程度以下まで抵抗に対して影響を及ぼさないか。今まで、まだ十分説明ができていない。実際現場で調査するとブルドーザ作業速度の変化範囲は0.69m/sec ~ 0.97m/sec (2.5 km/h ~ 3.5 km/h)である。しかし、作業速度は一般に0.69m/sec(3.0 km/h) 以下である。これ以上の速度は作業中使わない。ただ非作業中（現場で移動するとき）に0.69m/sec(3.0 km/h) 以上の速度を使う。ショベルでは掘削速度はバケット容量によって異なるが、一般に掘削速度が 0.38 m/sec 前後である。故に、農業機械のすきより建設機械のブルドーザ、ショベルなどのような機械の作業速度は低いから、作業速度が掘削抵抗に影響することを省略してもよいと考えられる。

ドンブロフスキーの提案¹⁰⁾

ソビエトのドンブロフスキー (Н. Г. Донбровровский) はカリョウチェキンの提案にもとづいて次の計算式を提案した。

掘削抵抗水平分力は

$$P_1 = k_1 b h \quad (2-5)$$

となる。

ここに： k_1 : 比掘削抵抗係数 (kgf/cm²)

である。比掘削抵抗係数 k_1 は種々の土について実験を行なっている値である。 k_1 値は土の性質、掘削装置の形などによって異なる。表 2-1 は実験から得られた k_1 値である。

彼は掘削抵抗水平分力 P_1 は 3 つの抵抗の和になることを研究した。即ち

$$P_1 = P_m + P_p + P_n$$

ここに、 P_m : 掘削装置と土との摩擦抵抗

P_p : 土の掘削抵抗

P_n : 運土抵抗ところがり抵抗

である。これらの抵抗の値は土の種類、掘削装置などによって異なる。その値を表 2-2 に示している。

比掘削抵抗係数 k_1 値 (kgf/cm²)

表2-1

土 の 名 称	機械式ショベル	ドラグライン	スクレーパ
	機械式バックホー		
乾燥、ゆるく詰った砂	0.16~0.25	0.28 ~0.45	0.25~0.40
砂質ローム、砂質ローム	0.30~0.70	0.60 ~1.20	0.53~1.05
粘性土、ゆるい粘性土、小さなレキ	0.60~1.30	1.00 ~1.90	0.95~1.80
粘性土、密に詰った粘性土	1.15~1.95	1.60 ~2.60	1.50~2.50
重質粘性土	2.0 ~3.0	2.60 ~4.00	2.50~3.90
軟レキ岩	2.31~3.1	3.10 ~4.00	
石まじり軟岩	2.8 ~3.25	3.70 ~4.20	
細かく破碎された岩	2.25~ 2.5	2.80 ~3.10	
破碎された岩	4.45~ 4.7	5.30 ~6.00	

掘削抵抗構成された各々抵抗の比 (%)

表2-2

土 の 名 称	掘削機械	P_p	P_n	P_n
乾燥、ゆるく詰った砂、砂質ローム、砂質ローム	ドラグライン	22	46	32
	スクレーパ	23	31	46
	機械式ショベル	42	51	7
粘性土、ゆるい粘性土、小さなレキ	ドラグライン	38	36	26
	スクレーパ	37	28	35
	機械式ショベル	63	31	6
粘性土、密に詰った粘性土	ドラグライン	58	22	20
	スクレーパ	46	17	37
	機械式ショベル	77	18	5
重質粘性土	ドラグライン	63	17	20
	スクレーパ	53	15	32
	機械式ショベル	83	12	5

なお、記号は次のとおりである（図 2-6）。 F ：排土板に働く切削抵抗（kgf）， F_p ：切削抵抗の排土板表面に垂直な成分（kgf）， F_f ：切削抵抗の排土板に平行な成分（kgf）， W ：切りくずの重さ（kgf）， G ：せん断面に働く合力（kgf）， α ：切削角度（排土板表面と切削方向とのなす角）（度）， θ ：切削土と排土板表面との摩擦角（度）， γ ：せん断面の方向（せん断面と切削方向とのなす角）（度）， ϕ ：砂の内部摩擦角（度）， l ：刃先から排土板表面上の着力点までの距離（cm）。 m ：刃先からせん断面上の着力点までの距離（cm）， n ：刃先から切りくずの重心までの水平距離（cm）。 L ：排土板の長さ（cm）， d ：切削深さ（cm）， b ：排土板の幅（cm）， X ：せん断面の長さ（cm）， β ：切削抵抗の方向（排土板が切りくずに与える力の方向と切削方向とのなす角）（度）。

以上の式を解くとき次の手順に従う。

F ， l ， β などを求めるには，まず γ を γ_1 と仮に定め，それに対応するすべり線
の方向を $\tau = \sigma \tan \phi$ によって定める。これから m ， n ， w ， G が決まり，それらを用いて式（2-6）～（2-8）の計算を行って γ の値 γ_2 を求める。この操作を繰返して逐次近似を行って最終的な γ の解を求める。さらに，この γ の値に対する m ， n ， w ， G を定め， F ， l ， θ ， β などを求めればよい。この砂の二次元切削理論式を用いて計算結果と実験値が比較的良好に一致するといっている。

畑村の解析方法は F 値（あるいは排土板に働く切削抵抗）最小値を与えるために逐次近似によってすべり面の方向 γ を種々に変えた。しかし，こうして求めた γ が正しい解であるという保証はどこにあるのか，この点について説明していない。または，畑村の解析方法によって切削抵抗を計算すると，未知数が多いので，不便の感がある。

Reece の提案⁹⁾

一般に土を掘削するとき刃に作用する受働土圧（ P ）は

$$P = (\gamma, \phi, c, c_a, \delta, \alpha, d, q) \quad (2-9)$$

ここで γ, ϕ, c ：土の性質

c_a, δ ：土と刃との接触の性質

α, d ：接触面形状の性質

q : 水平面のサーチャージ

(2-9) 式にて表わされる。

Reece はテルツァギ (Terzaghi) が 1943 年に提案された浅い基礎極限支持力公式により 1965 年に刃面にかかる抵抗の計算式について提案している。

Reece によると次式にて刃面にかかる抵抗を求めることができる。

$$P = (\gamma g d^2 N_r + c d N_c + q d N_q) W \quad (2-10)$$

ここに P : 排土板にかかる合力, γ : 土の密度, g : 重力加速度, d : 掘削深さ, c : 土の粘着力, q : 土かぶり荷重, W : 掘削幅, N_r , N_c , N_q : テルツァギの支持力係数。

式 (2-10) 適用の原則は 1) , 土と金属 (排土板) との摩擦角 δ が 0 から土の内部摩擦角 ϕ までの範囲内, すなわち, δ が $0 \sim 45^\circ$ の範囲内である。 2) , 刃と地表面との傾き角 α (掘削角) は $0 \sim 90^\circ$ の範囲内である。 Reece の支持力係数の取方は 1) 土質の条件, ϕ , δ , 刃の形状係数 b/d および掘削角 α をパラメータにして, 実験結果による整理した図から読みとる。 2) 次の式は Reece の支持力係数値を計算する方法である。

$$N_r = 1/2 (\cot \alpha + \cot \beta) / \{ \cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta) \cot(\beta + \phi) \} \quad (2-11)$$

$$N_c = \{ 1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi) \} / \{ \cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) \cot(\beta + \phi) \} \quad (2-12)$$

$$N_q = 2 N_r \quad (2-13)$$

なお, 破壊面の傾角の値を決める方法は式 (2-10) の N_r が刃および土の諸元に対して最小になるような β の値を決定する。

その後, リース (Reece) は排土板の実験にもとづいて土の掘削抵抗を

$$P = (\gamma d^2 N_r + c d N_c + q d N_q + c_a d N_{ca}) W \quad (2-14)$$

と訂正した。ここに C_a : 土と金属 (刃) との付着力, この計算式の適用範囲は刃の幅が狭く, 土と金属との摩擦角 δ は土の内部摩擦角 ϕ との差が $2/3$ 場合である。 ϕ の範囲は $0 \sim 45^\circ$ であり, 掘削角 α は $0 \sim 90^\circ$ の範囲である。Reece の N 係数の取り方は前述べたと同じ。その他

$$N_{ca} = [1 - \cot \alpha \cot (\beta + \phi)] / [\cos (\alpha + \delta) + \sin (\alpha + \delta) \cot (\beta + \phi)]$$

になる。(式2-14)によると、掘削抵抗に影響を受けることは次の要素に関係がある。

1) , 土の内部摩擦角 ϕ 。もし ϕ が大きければ、係数 N_r , N_c , N_q および N_{ca} の値が大きくなり、 P の値も大きくなる。

2) , 土の粘着力 c 。 c 値が大きくなれば、(式2-14)の $c d N_c$ の値が大きくなる。故に、掘削抵抗 P の値が大きい。

3) , 土の密度 γ 。 γ 値が式(2-14)中に $\gamma d^2 N_r$ と $q d N_q$ の値に関係があるので、 γ 値が大きくなると、 P の値も大きくなる。

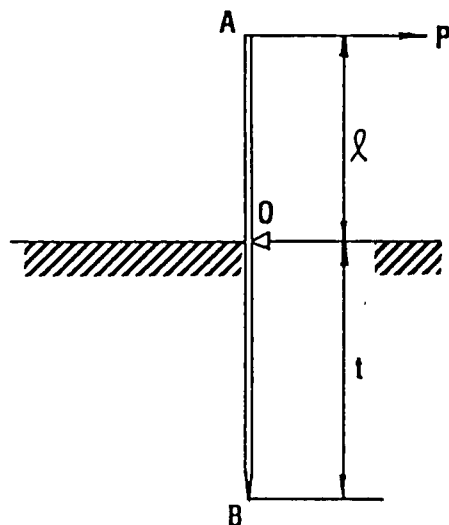
4) , 掘削幅 W 。掘削幅 W が大きくなると、掘削抵抗 P も大きくなる。

5) , 掘削深さ d 。掘削深さ d が大きくなると、掘削抵抗 P も大きくなる。

Reece が提案した計算式を検討すると、ブルドーザのような建設機械に対しては掘削抵抗を計算する方法として適当かもしれないが、油圧ショベルに対してはこの計算方法は適当ではないと考えられる。その理由はこの計算式を利用する一つ条件として掘削角が $0 \sim 90^\circ$ (垂直方向から水平方向まで)である。しかし、この範囲内油圧ショベルはほぼ掘削完了である。

島の研究^{1) 2) 3) 4)}

島は数多くの実験結果にもとづいて掘削機構に関する研究理論を発表した。そのな



①全長(= $l + t$)

②幅(b)

③回転速度: $1^\circ \sim 2^\circ / \text{sec}$

$$R_s = P l / b t^3 \quad (\text{kgf/cm}^3)$$

図2-7 比掘削抵抗 R_s の測定方法

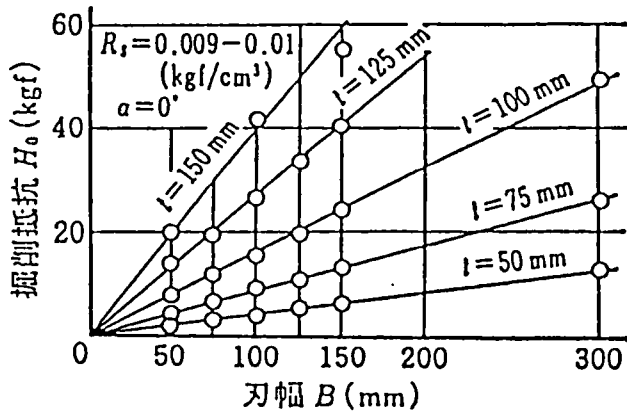


図 2-8 抵抗と刃幅の関係

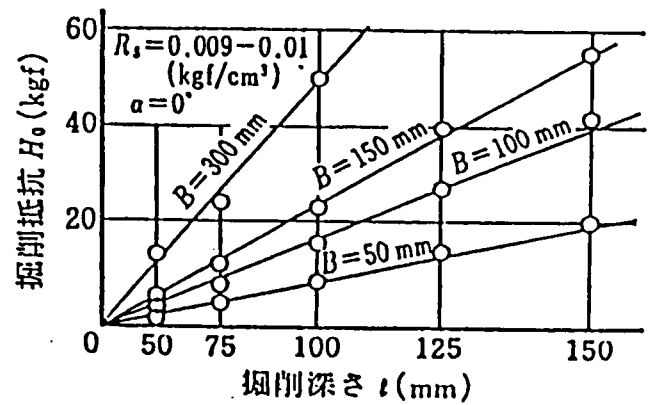


図 2-9 抵抗と深さの関係

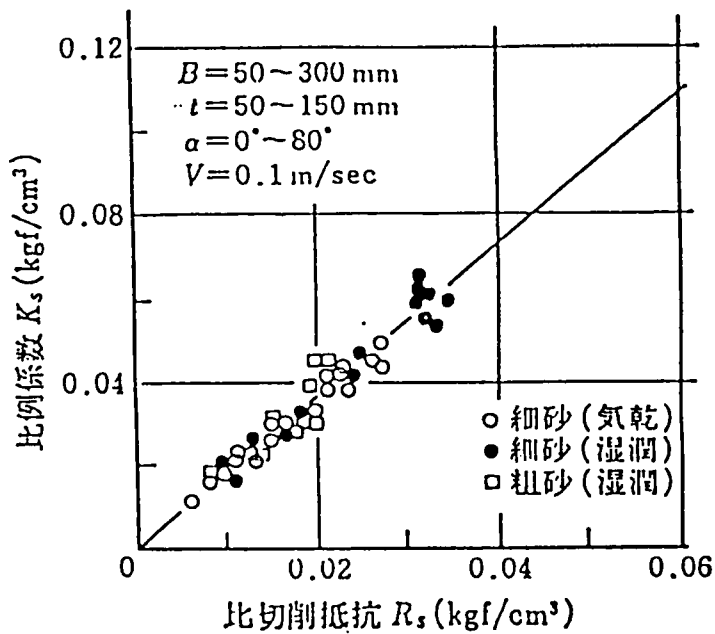


図 2-10 比例定数 K_s と比掘削抵抗 R_s

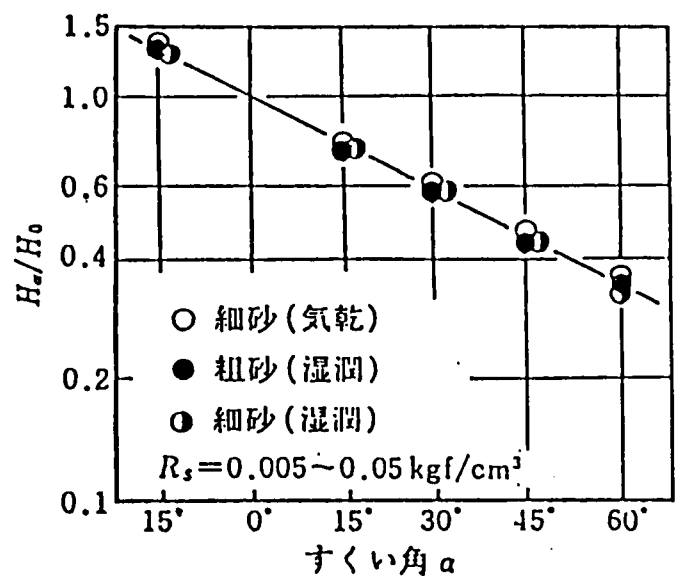


図 2-11 H_a/H_0 と α

ちで，比掘削抵抗 R_s （ R_s の測定方法と計算方法は図 2-7 に示す）および掘削抵抗の計算式などについて提案されている。多くの実験の結果により，砂質土では抵抗は刃幅と掘削深さの 2 乗に比例することがわかった（図 2-8，図 2-9 参照）。そのときの比例定数を K_s とし， K_s と R_s を比較すると，図 2-10 のように正比例関係にあることがわかる。次に H_α とすくい角 α との関係を図 2-11 に示すと，片対数で直線関係にある。これらをまとめると（ α はラジアンで表す）。

$$H_\alpha = K_s R_s B t^2 10^{-m\alpha} \quad (2-15)$$

ここに， K_s : 比例定数 $K_s = 1.8$

R_s : 比掘削抵抗 (kgf/cm³)

B : 刃幅 (cm)

t : 掘削深さ (cm)

m : 実験係数 砂質土に対して $m = 0.45$ となる

α : すくい角 (ラジアン)

になる。

島の提案されている計算式を検討すると，掘削抵抗に影響を及ぼす要素は刃幅 B ，掘削深さ t のほか，掘削角（或いはすくい角）も考えられる。故に，以上述べる 2 つ計算式（すなわち（2-4）と（2-5））の不足部分を補充している。

掘削抵抗に関する研究は古くから行われている。特に，ブルドーザー，クラムシェル，ラダーエクスキャベーター，バケットホイールエクスキャベーターなどについての研究は盛んであり，多くの研究論文が発表されている。しかし，これらの研究条件には掘削深さの変化が一定，あるいは，掘削深さの変化があまり大きくないようである。掘削深さの変化が小さいと，外力（掘削抵抗）を把握することがわりに容易である。

1950 年前後，油圧ショベルは急速的な成長してきた。ところが，油圧ショベルの成長するのに反して掘削抵抗に関する研究はあまり行われていない状態である。

1970 年前後，ソビエトで油圧ショベルと土の掘削に関する研究を行っている。そのうち，モスクワ自動車道路大学と全ソ建設道路機械科学研究所は油圧ショベルの掘削に関する研究を共同で行った。実験研究は室内で行った。実験装置はバケット模型を使わなかったが，鋼板で作られた刃形（ブレード）装置（図 2-12 参照）で掘削状

態は油圧ショベルで土を掘削する状態とまったく同じ状態である。実験中使用した試料は含水量 5% の砂である。掘削条件はブレード幅は 200 mm で、厚みは 0.4, 1.0, 2.0, と 4.0 cm であり、掘削角は 20° , 40° , 60° , 80° と 90° それぞれ変化させて実験が行なわれた。実験後、その実験結果による掘削するときの掘削抵抗変化のグラフ（図 2-13 に示す）と実験式（式 2-16 ように）が発表されている。

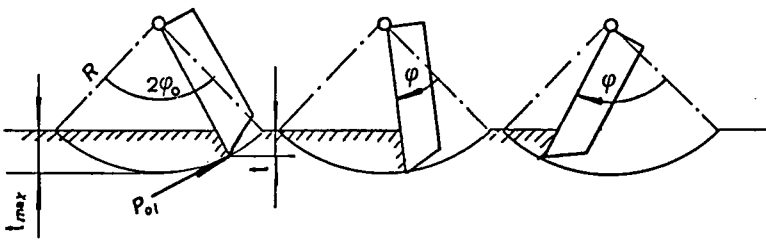


図 2-12 実験装置の掘削状態

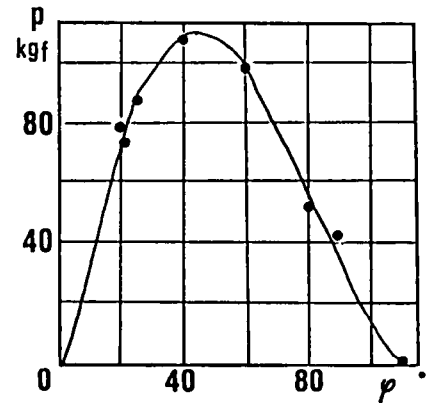


図 2-13 掘削抵抗変化のグラフ

掘削切線分力は次の式

$$P_{01} = c [R (1 - \cos \phi_0 / \cos |\phi_0 - \phi|)]^n B A Z X + D \quad (2-16)$$

になる。

ここに、 c : 土の硬さ係数

$$c = 15 \sim 20$$

R : 掘削半径

ϕ_0 : 掘削中バケット全回転角の $1/2$

ϕ : バケット回転角

n : 指数

$$n = 1.35$$

B : 掘削幅の影響係数

$$B = 1 + 2.6 b$$

b : 掘削幅

A : 掘削角の影響係数

$$A = 1.3$$

Z : 爪の影響係数（爪がある場合 $Z = 0.75$, 爪がない場合 $Z = 1.0$ ）

X : バケット側面厚みの影響係数 $X = 1.15$

D : 掘削刃の土への貫入力 D = 1000 ~ 1700 kgf

である。

この実験式を検討すると、式の中で

$$R \{ 1 - \cos \phi_0 / \cos (\phi_0 - \phi) \} = t$$

である。すなわち、ショベルで土を掘削するときの瞬間掘削深さである。故に、この関係式によって掘削深さが深くほど掘削抵抗も大きい。また、掘削抵抗は土の強度によって異なり、掘削装置によっても異なることを示している。しかし、掘削刃の土への貫入力 D の値は中型、大型油圧ショベルに対して適当かどうかかわからないが、小型ショベル、特にミニショベルに対しては適当ではないかと考えられている。

近年、経済の高度成長にともなう建設労働力の不足、労働意識の変化、労務費の高騰などにより、小規模作業も機械化による省力化が呼ばれ、小型、ミニ機が急テンポで普及してきた。次の表 2-3 に日本国の建設機械製造会社で作られている小型ショベル、ミニショベルの主な仕様を示している⁸⁾。

表2-3

製 作 会 社	型 式	バケット容量		全装備重量(t)	最大掘削力(tf)
		山積(m³)	平積(m³)		
イワフジ工業	CT-100R	0.05	0.03	1.10	0.90
石川島播磨重工業	IS-10S-2	0.027	0.023	1.20	1.00
久保田鉄工	KH-35	0.033	0.029	1.34	0.86
小松製作所	PC05-5	0.04	0.03	1.10	1.00
日産機材	N-06	0.04	0.03	1.20	1.10
日立建機	UH004	0.033	0.029	1.23	0.86
三菱重工業	MS010	0.04	0.03	1.23	1.10
古河鋳業	FH075	0.07	0.04	1.40	1.10

もし、実験式(2-16)による掘削抵抗を計算すると、油圧ショベルにはその D 値だけで1000 kgf以上の掘削力が必要である。そうすれば表 2-3 に示している油圧

シヨベルの最大掘削力は掘削抵抗より小さいので、これらの機械は土を掘削することができない。実際の場合にはこれらの機械が現場で使われている状態である。故に、この実験式により掘削抵抗を計算することが適当かどうかということは疑問である。

2-5 むすび

本章においては土の掘削抵抗の解析方法について略述した。その解析方法はいままで二つに大別できる。一つは土圧論的考え方で、他は実験的方法である。前者は刃面を壁面と考えて受働土圧の考えで計算を進めるものである。いずれも刃の前方に生ずるすべり面の形を仮定して、土塊の釣合いから追究してゆくものである。応用範囲がひろいが、土質常数が正しく測定されているかどうか問題である。本章で述べた掘削抵抗解析方法のうちではリース (Reece) と畑村の解析方法が受働土圧論の解析方法に属する。

後者は多数の実験をもとにして実験式を求める方法で、適用範囲は限られてくる。実験式としては、土の特性値を求めることが必要である。たとえば、比掘削抵抗 (単位体積あたりのものと、単位掘削辺長当りのものがある) などである。本章で述べた掘削抵抗解析方法について畠、カリョウチェキン、ドンブロフスキーなどの研究はこの範囲に属する。

つぎに、本章では掘削抵抗解析方法についてカリョウキキン、トンブロフスキー、リース、畑村および畠等について従来研究成果について整理し、実際に解析する適用性および利点、欠点について検討した。土圧論の解析方法はいままで建設機械分野では大勢の研究者たちによく使われているのが現状である。解析手法は土質工学的土圧論のクーロン土圧論 (畑村) を用いる方法がよく使われている。そのうち、理論値は実験値とよく一致することもある。

畠や著者の意見では、土圧論を用いる解析方法には2つ問題がある。1つは着力点の位置である。すなわち、掘削抵抗の着力点の位置が下ることである。土圧論によると、刃の下端から掘削深さの $1/3$ のところにあるが、畠はその点について多数の実験を行った結果、掘削抵抗の着力点の位置は土圧論による点よりもっと下のところにあることを確めている。故に、従来の土圧論では正確な現象を把握できないことが畠に

より指摘された。一方、受働土圧論は静止状態の土が擁壁から押されて、極限状態に到達する際に擁壁が受ける抵抗を求める方法としては十分であるが、土の掘削においては、掘削装置は土を土の母体から切りはなす他にその切りはした土も動かす。そのとき、土と土との摩擦抵抗、土と金属との摩擦抵抗も同時に存在しているのである（擁壁のときも摩擦抵抗は存在する）。特に油圧ショベルで土を掘削するとき、最大掘削深さに達する前に刃面（バケット）の切刃の形が擁壁の一辺と全く違う（図2-14に参照）。最大掘削深さ以後、その刃面の形は擁壁の一辺と同じであるが、そのときの掘削はほぼ完了に近くなっている。故に、土の掘削抵抗を算出する際土圧論により計算する方法は適当ではないわけである。以上述べたのように掘削抵抗を正確的把握するために、いまでは実験的方法しかないのかもしれない。

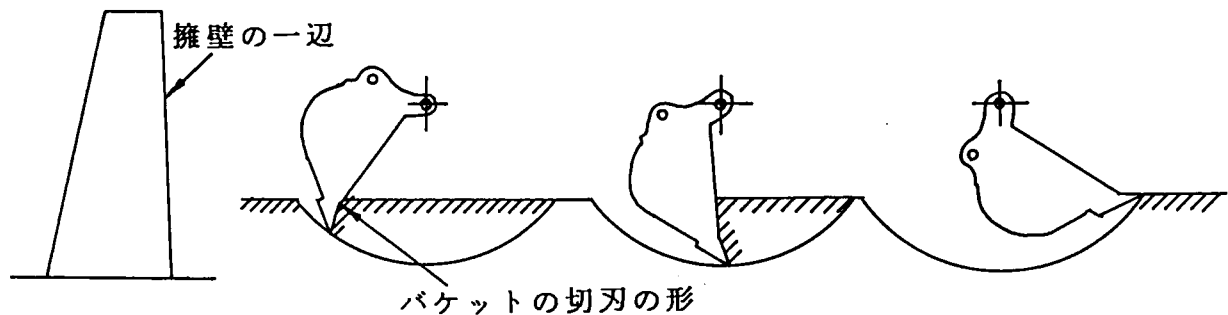


図2-14 擁壁形とバケット形の略図

以下、本論文においては、主として実験による土砂の掘削特性について考察し、更に詳細に分析していく。

参 考 文 献

- 1) 畠 昭治郎著：建設機械学，鹿島出版会，pp.151～ 158，1987年
- 2) 畠 昭治郎： 土の掘削機構について，土質工学会編「土と基礎：最近の工法」第1章，pp.1～18，1967年
- 3) 畠 昭治郎：土の掘削について，建設機械 Vol.19, No.4，pp.30 ～35，1983年
- 4) 畠 昭治郎：海底砂地盤の掘削とその応用，土木学会論文報告集，第 288号，pp. 127 ～ 137，1979年
- 5) 赤井 浩一著：土質力学，朝倉書店，1966年
- 6) 赤井 浩一監修：大草重康訳，フローリンの土質力学第Ⅲ巻，森北出版，1971年
- 7) 畑村 洋太郎，千々岩建児：土の切削機構の解明，日本機械学会論文集，41巻349号，1975年，42巻 359号，1976年
- 8) 日本建設機械化協会編：日本建設機械要覧，日本建設機械化協会発行，pp30～93，1986年
- 9) Reece, A.R. (1965). The fundamental equation of earthmoving mechanics. Symposium on Earthmoving Machinery, Institute of Mechanical Engineers 179, Part 3F, London.
- 10) А. А. Бромберг: Машины для земляных работ (Теория и расчет), Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, pp86～89, 1959年

第3章 土の比掘削抵抗 R_s に関する考察

3-1 概説

建設機械の掘削装置で土を掘削するところをみると、その現象はきわめて複雑であり、多くの原因が重なって現われるのである。その掘削の機構については、すでに前章において述べた。しかし、未解明のことも多くあるのである。前章で述べたように土の掘削抵抗を算出する方法は大別して2つ方法がある。すなわち、1つは土の強度定数 c 、 ϕ （粘着力および内部摩擦角）を用いて土圧論などにより計算する方法（以後 $c-\phi$ 法と呼ぶ）であり、他の1つはその土の特性値、たとえば、その土に固有の掘削抵抗指数（一般に土の比掘削抵抗ともいわれている）を求めて、それから実験式を用いて掘削抵抗を算定しようとするものである。

本章においては、その土の特性値について、測定方法、土の力学定数との関係などについて述べる。

3-2 土の比掘削抵抗

土の掘削においてはその掘削抵抗を求めるための目安としていろいろな係数が考えられる。そのうち、重要な係数は比掘削抵抗である。換言すれば、掘削抵抗に影響する要因のうち機械自体の問題のほかに土質の影響も最も重要なものである。土質は一般に密度、含水量、粒度組成などによって異なる。これらの土質条件を一つの指標に変換させるために比掘削抵抗というものが考えられる。

比掘削抵抗は刃、爪、ブレードなどに作用する掘削力と土質の関係、すなわち、土質に対する掘削抵抗を表示するものである。普通、つぎの3つの種類によってこの比掘削抵抗の単位を表わす。

（1）掘削幅＋掘削深さの単位掘削長さ（ cm ）に作用する掘削抵抗で kgf/cm で表示される。これは掘削断面積の形状にあまり影響を受けず略同一の数値を示すものでは、この数値を基準として採用することが多いようである。たとえば、バケットホイールエクスカベータの掘削抵抗を求めるため用いている⁶⁾。

（2）単位掘削断面積（掘削幅×掘削深さ）に作用する掘削抵抗で kgf/cm^2 で表示さ

れる。これは次元解析と実験結果によると、粘性土の場合に掘削抵抗を求めるときよく使われている係数である⁶⁾。

(3) 単位掘削体積 (掘削体積とは掘削幅と掘削深さの2乗との積) に作用する掘削抵抗で kgf/cm^3 で表示される。これも次元解析と実験結果によると、砂質土の場合に掘削抵抗を求めるときよく使われている係数である⁶⁾。

土の比掘削抵抗の値は従来多くの土質について実験された。多くの実験の結果によって土の性質との関係を求めた。この値 (比掘削抵抗) は勿論測定方法によって異ってくるものである。本章においては土の比掘削抵抗 R_s の測定方法、 R_s と土との力学定数との関係などについて詳述する。

3-3 比掘削抵抗 R_s の測定方法¹⁾

畠は実際の掘削によく似た破壊機構の下で、比掘削抵抗を測定することを考えて、比掘削抵抗 R_s を提案した。 R_s の測定方法は図3-1に示すように全長50 ($= l + t$) cm, 幅 (b) 5cm の鋼板を地盤を乱さないように土中に深さ t だけ貫入させ、地表面を固定支点としてゆっくり (鋼板の回転速度で $10 \sim 20 / \text{sec}$ 程度) 掘り返したときの最大掘り返し力 P を測定し、その時の最大モーメント $P l$ を鋼板の幅 b および地中深さ t の3乗で除したものである。すなわち、次式に示すように、

$$R_s = P l / b t^3 \quad (3-1)$$

である。

図のように鋼板の地中部分に作用する抵抗合力を R として、その固定支点 O からの距離 (モーメントのアーム長さ) を $k t$ ($0 < k < 1$) とすれば、 O 点のまわりのモーメントのつり合いから $P l = R k t$ が得られ、これを式 (3-1) に代入すると

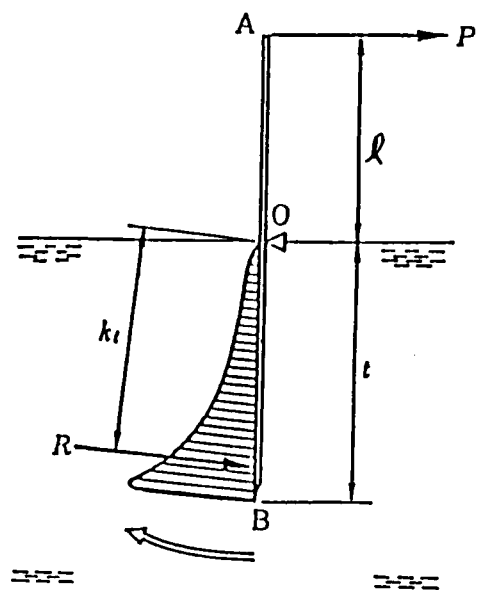


図3-1 比掘削抵抗の測定法

$$R_s \cdot t = R_k / b \cdot t$$

となる。右辺は板面にかかる平均抵抗に k を乗じたものであるから、平均抵抗が深さに比例して増大するとしたときの比例係数が R_s 、すなわち、比掘削抵抗ということになる。

比掘削抵抗 R_s は畠研究室でよく用われてきたばかりでなく、今、建設機械分野で広く用われているのが現状である。

3-4 比掘削抵抗 R_s と土の力学定数との関係

3-4-1 畠の研究^{1) 2)}

畠は R_s 実験法から考えて土の比重、締固め度（相対密度）、粒度分布および粒形に関係があると思って以下のような実験を行った。

R_s の大きさを支配するものは、まわりの砂の拘束度であり、これは粒度分布粒形と相対密度の関数である。すなわち、粒度分布の良い（細砂から粗砂まで範囲の広いもの）ほど、また締固めるほど（相対密度が大きいほど） R_s は大きくなるはずである。 R_s が土の比重、締固め度（相対密度）、粒度分布および粒形との間にどのような関係があるかを調べるため、室内実験を行った。

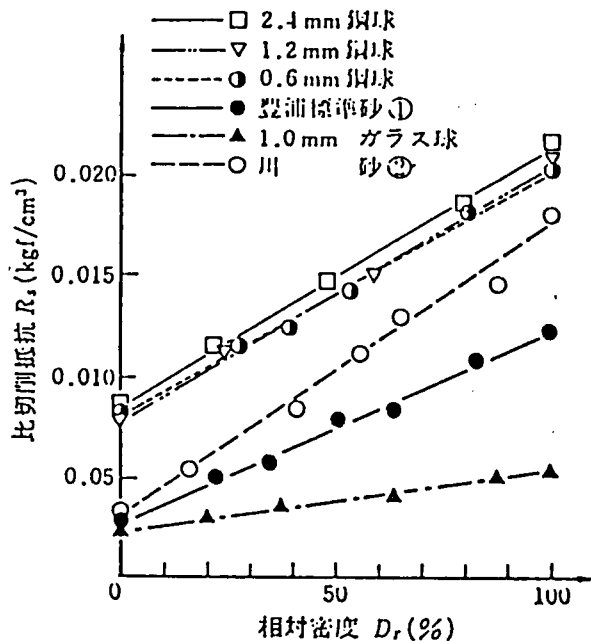


図 3-2 粒径のそろった試料の比掘削抵抗 R_s と相対密度 D_r の関係

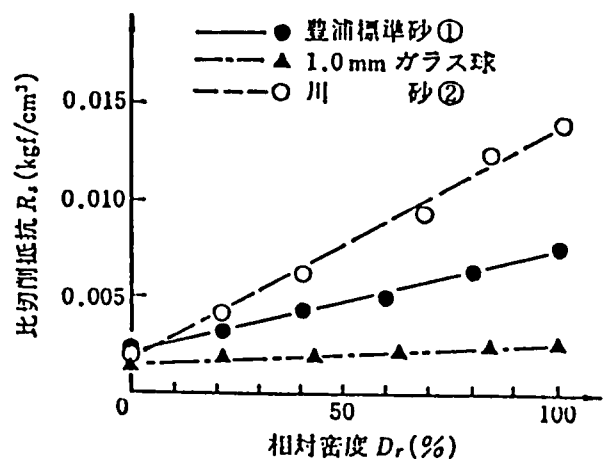


図 3-3 左図のものの水中での値

実験試料としては比重 7.80 の 0.6 mm 径鋼球，1.2 mm 径鋼球および 2.4 mm 径鋼球と，比重 2.63 の豊浦標準砂と，比重 2.66 の川砂でおよび 1.0 mm 径ガラス球である。まず，これらの試料を用いて R_s と D_r の関係を調べた。調べた結果が図 3-2 である。図をみると R_s は D_r に正比例し，比重に比例し，粒形が角張って粒度分布のよいものほど大きい。

次に，これらの試料のうち鋼球を除いたものを水中に入れて測定してみたところ，図 3-3 のようになり，図 3-2 に比べると比重が 1 だけ小さく（水中重量）なった影響がはっきり現れている。

一般に，土は大小さまざまな土粒子が混ざり合っていてできている。土粒子の大きさを粒度といって，粒径によって表す。粒径がほとんど一定のような砂の場合は，図 3-2 と図 3-3 のように， R_s と D_r は直線関係があるが，もっと粒径の異なったものが混じっているときにどうなるかというのを調べてみる。用いた試料の粒度曲線を図 3-4 に示す。図 3-4 では，①豊浦標準砂，②川砂，③ $U_c = 2$ ，④ $U_c = 4$ ，

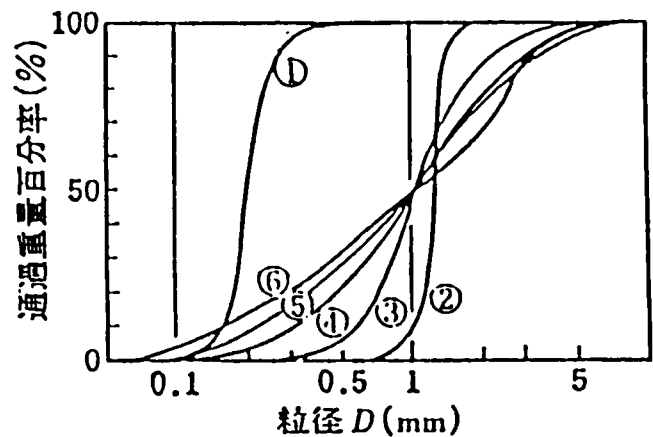


図 3-4 粒径のそろっていない試料

⑤ $U_c = 6$ ，⑥ $U_c = 10$ である。これらの試料は図 3-4 のように豊浦標準砂を除いて平均粒径を 1 mm 付近になるようにし，均等係数 U_c ($= D_{60} / D_{10}$) を 2, 4, 6, 10 と変えたものである。この結果は図 3-5 のようで，均等係数が小さい砂と大きい砂とでは， R_s と D_r との関係に相違があり，その値が小さい砂では R_s と D_r が直線関係となり（図 3-2 と図 3-3 参照），その値が大きい砂では $\log R_s$ と D_r が直線関係となる。その傾きは U_c の大きいほど立ってくる。これを水中で測定したものが，図 3-6 で，全体として水中重量に比例して R_s の値が下がっている。

さらに，種々の粒度分布のもので測定したところ，図 3-7 のようになり， $\log R_s$ と $\log \bar{R}$ が直線上にのっている。ここで， R_s は $D_r = 100$ % のときの値であり，ま

た \bar{R} は

$$\bar{R} = (D_{15}/D_{50})^2 (D_{50}/D_{85})$$

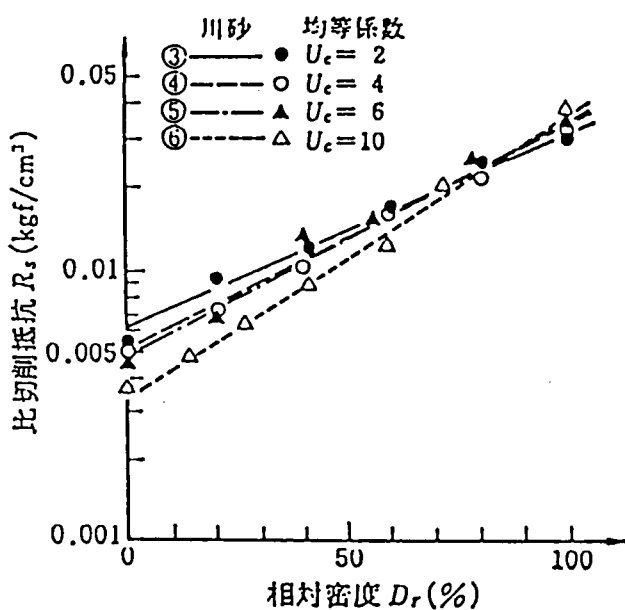


図 3-5 粒径のそろっていない試料の $R_s - D_r$ (空中)

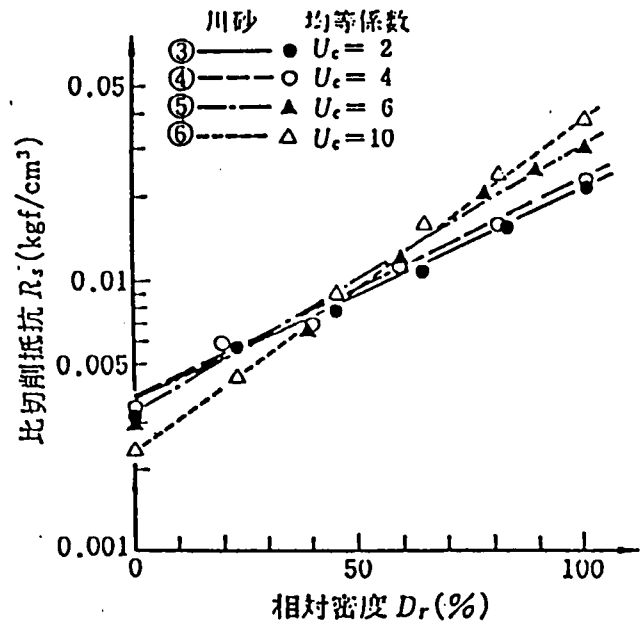


図 3-6 粒径のそろっていない試料の $R_s - D_r$ (水中)

である。したがって、砂の粒径加積曲線さえわかれば、15%粒径 D_{15} 、平均粒径 D_{50} および 85 % 粒径 D_{85} から R_s を推定できることがわかった。

3-4-2 実験の目的と内容

種々の実験の結果によると比掘削抵抗 R_s は殆んどすべての土に対してその掘削抵抗と比例関係を示す。比掘削抵抗 R_s の値は土の種類、比重、含水比および締まり具合（粒度分布）の状態などにより変る。その

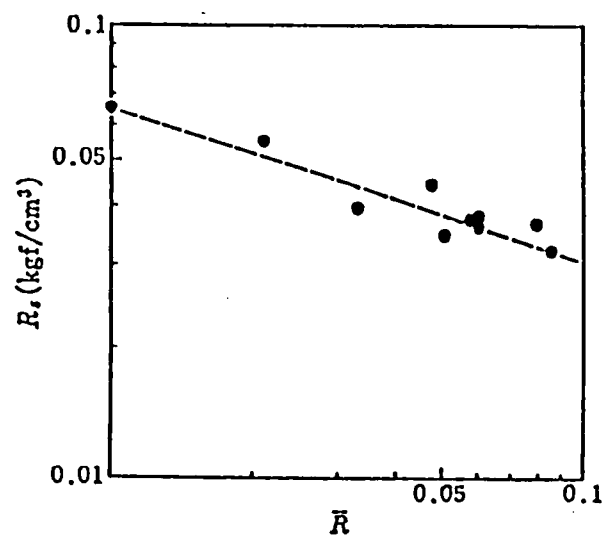


図 3-7 粒度分布から R_s ($D_r = 100\%$) の推定

値の測定方法は現場で土質調査をして地盤のせん断強度を把握するという意味では最も簡単な方法である。しかし、余ほど注意深く行わないと誤差が生じ易いことおよび実験深さを種々に変えてそれぞれ数回の測定を要とする。また、鋼板を押込む時にまわりの土を弛めてしまうという欠点がある。そのために、比掘削抵抗 R_s とその他の土質調査により求めた土質特性との間の関係を求めることにする。

現在、地盤の非排水せん断強度を測定するために用いられている強度試験方法は現場から採取された乱さない試料による一軸圧縮試験、UU三軸試験、あるいは一面せん断試験などの室内試験とコーン貫入試験、ベーン試験、標準貫入試験などの原位置試験である。

本章においては粘性土、シルトについてベーンせん断強度、コーン指数などと比掘削抵抗 R_s との関係を実験により明らかにし、土の掘削抵抗をベーンせん断強度、コーン指数などを用いて計算できるようにしたものである。

本実験では不飽和砂、粘性土およびシルトを用いた。小豆島砂の含水比は 11 種類（0.27 ~ 11.94%）、標準砂の含水比は 3 種類、シルトの含水比は 7 種類（6.84 ~ 27.41%）、粘性土の含水比は 3 種類（22.21 ~ 32.93）変化させた。それぞれの含水比についてゆる詰め、密詰めとその中間の詰まり具合の砂、粘性土、シルトに対して実験を行った。一面せん断試験を行ったとき、その上載荷重は 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 および 1.2 kgf/cm² とした。故に、砂、粘性土、シルトの各種実験（ R_s , C_u , q_c など）中に変化させたパラメータは含水比と密度の 2 種類であり、それぞれ試料に対して R_s , C_u , q_c などの値を得た。

比掘削抵抗 R_s とベーンせん断強度、 C_u 、コーン貫入抵抗 q_c などがどのような関係にあるのかを調べるため種々の含水比、密度の粘性土、シルトについて小形土槽で実験を行った。

R_s の測定には厚さ 3.0 mm、幅 50 mm の測定板を使用した。粘性土とシルトの場合では測定深さは 50 mm, 75 mm, 100 mm、とし測定板の転倒させるときの回転速度は 10 ~ 20 /sec である。

3-4-3 実験試料および力学的特性

実験に用いた試料は小豆島砂，標準砂，深草粘土および京都路西で採取したシルトであり，それら試料の粒径加積曲線を図3-8に示す。含水比を変えることによってそれらの物理，力学の性質は変化している。それらの物理特性は表3-1に示すようである。

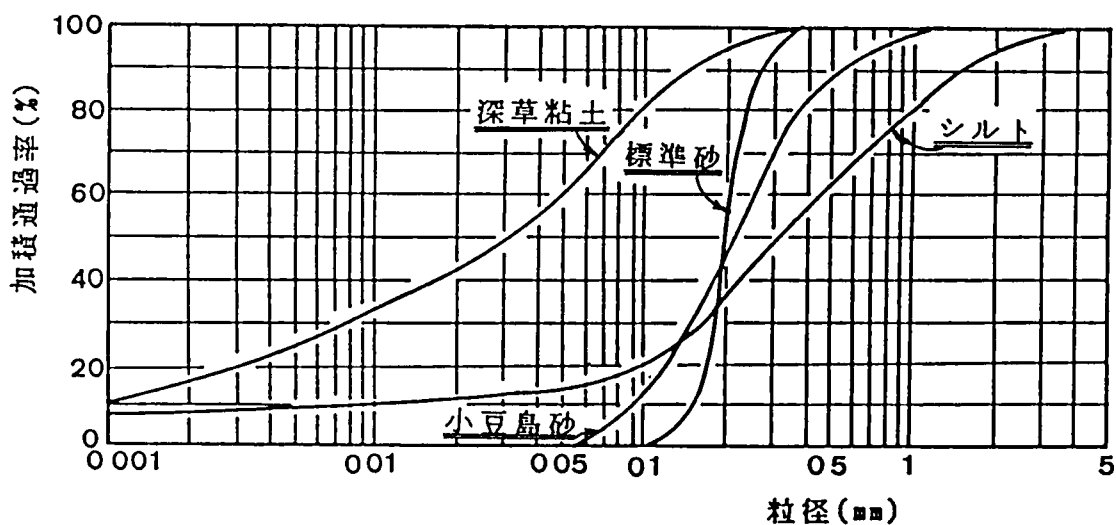


図3-8 試料の粒径加積曲線

表3-1 実験に使用した試料の性質

試料 試験内容	小豆島の砂	豊浦標準砂	深草粘土	京都路西シルト
含水比 $\omega(\%)$	0.27~11.94	2.57~4.29	22.21 ~ 32.93	6.84~27.41
乾燥密度 $\rho_d(g/cm^3)$	1.144 ~ 1.737	1.241~1.473	0.683~1.203	1.078~1.854
内部摩擦角 $\phi(deg)$	28.0~36.7	32.65 ~ 34.09	8.87 ~ 13.01	3.50 ~ 40.85
粘着力 $C(kgf/cm^2)$	0.000~ 0.058	0.000	0.314 ~ 0.338	0.000~0.362
真比重 G_s	2.660	2.630	2.687	2.644

3-4-4 実験結果および考察

1) R_s と ρ_d との関係

用いた試料の実験結果により乾燥密度の増加と共に比掘削抵抗 R_s が増加することがわかった。これらの関係を調べたものが図3-9 a, b, cである。

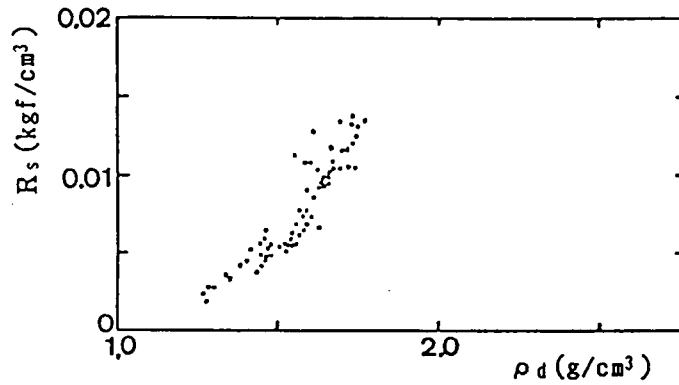


図3-9 a 小豆島の砂乾燥密度 ρ_d と
比掘削抵抗 R_s との関係

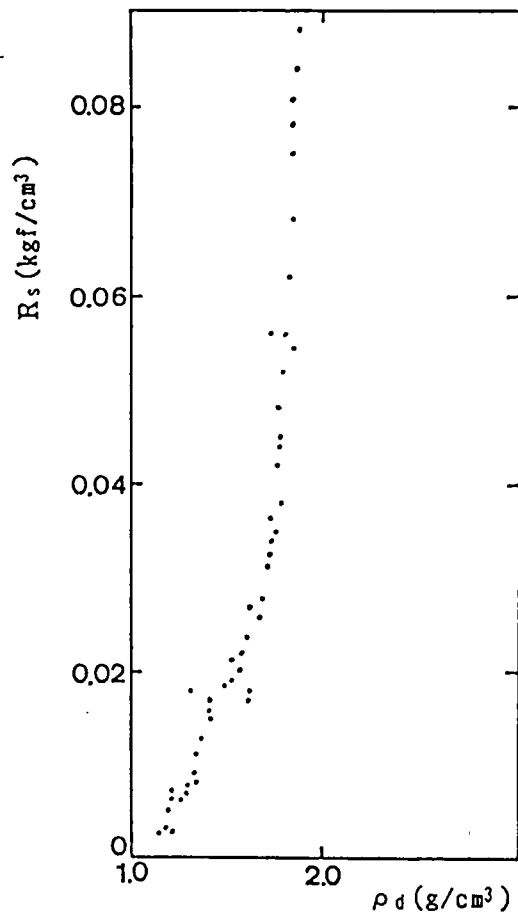


図3-9 b シルト乾燥密度 ρ_d と
比掘削抵抗 R_s との関係

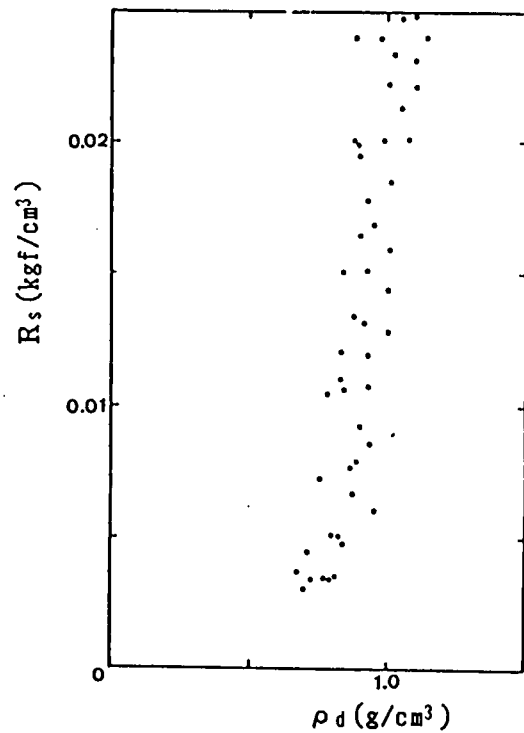


図3-9 c 深草粘土乾燥密度 ρ_d と
比掘削抵抗 R_s との関係

実験によって両者は次の関係がある。

砂質土の場合

$$R_s = 7.55 \times 10^{-4} \rho_d^{5.02} \quad (\text{相関係数 } 0.91)$$

シルトの場合

$$R_s = 1.89 \times 10^{-3} \rho_d^{5.45} \quad (\text{相関係数 } 0.96)$$

粘性土の場合

$$R_s = 3.76 \times 10^{-2} \rho_d^{7.59} \quad (\text{相関係数 } 0.81)$$

土が種々の粒径をもった粒子から成り立っているときは大きな粒子の間げきを小さな粒子で埋め、更に、この間げきをより小さい粒子で埋めるために密度は更に増大する。

土の密度に影響を与える因子としては、①混合されている粒子の状態（粒度分布）であり、②締固めを行なったときのエネルギーであり、③含水量である。一般に、密度が大であるということは単位体積中の土粒子の量が多いということであるから当然せん断強度も大となる。

2) R_s と q_c との関係

粘性土の強度を現場で測定する方法としてはコーン試験が簡単であり、現在円錐貫入試験機が最も多く用いられている。

この試験法の主な特徴はコーンの静的貫入に対する土の抵抗が連続的に得られ、この抵抗が土のせん断強さと密接な関係にあることである。

今回実験で用いた静的コーン貫入機は単管式（鉄研 I 型コーン）である。その円錐頂角は 30° 、底面積 7.065 cm^2 であり、実験時の貫入深さは 10 cm である。だが、コーン貫入速度によって測定値はかなり異なるのである。一般的に貫入速度は 1 mm/sec にするとよい⁴⁾⁵⁾。

コーン貫入抵抗 q_c と比掘削抵抗 R_s との間にどのような関係があるのかを調べるため これらの試料について q_c と R_s との関係を求めた。実験結果によると q_c と R_s は直線関係にあることがわかった（図 3-10 a, b 参照）。

なお、この場合は両者の相対的な関係式のみを求めることを目的として、次の関係式になる。

シルトの場合

$$R_s = 0.00653 q_c$$

(相関係数 0.962)

粘性土の場合

$$R_s = 0.00908 q_c$$

(相関係数 0.976)

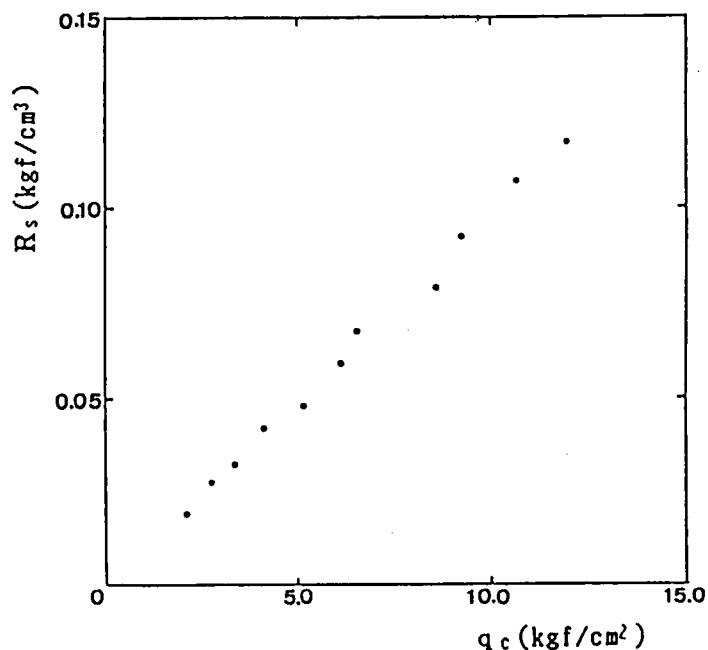
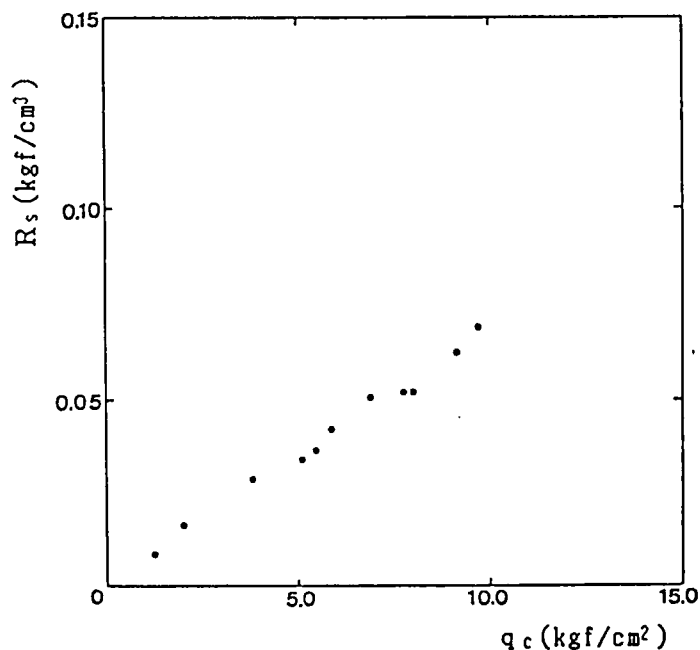


図 3-10 a シルトコーン指数 q_c

図 3-10 b 深草粘土コーン指数 q_c

と比掘削抵抗 R_s との関係

と比掘削抵抗 R_s の関係

3) R_s と C_u との関係

土質調査の目的は殆どの場合次のいずれかである。①地盤に载荷や掘削を行うとすれば地盤はどんな挙動をするかを予測するため、②地盤が破壊などの予期しなかった挙動を示した場合、その原因を調べるために行う。いずれの場合も地盤の現状からその地盤が想定された状態に移行した時に示す挙動を推定するのが土質調査の目的といえよう。ベーンせん断試験は地盤の非排水せん断強度を原位置で測定するための一つの方法である。

ベーンせん断強さ C_u と比掘削抵抗 R_s との間にどのような関係があるかを調べるため、室内実験を行なった。

ベーン試験には高さ 40 mm, 幅 20 mm 4 枚羽根から構成されたベーンを使用した。回転角速度 0.1 deg/sec を標準としてベーンを回転させ最大トルクを記録する^{4) 5)}。

実験結果による比掘削抵抗 R_s とベーンせん断強度 C_u との関係は図 3-11a, b に示す。いずれも直線関係になることが判明した。

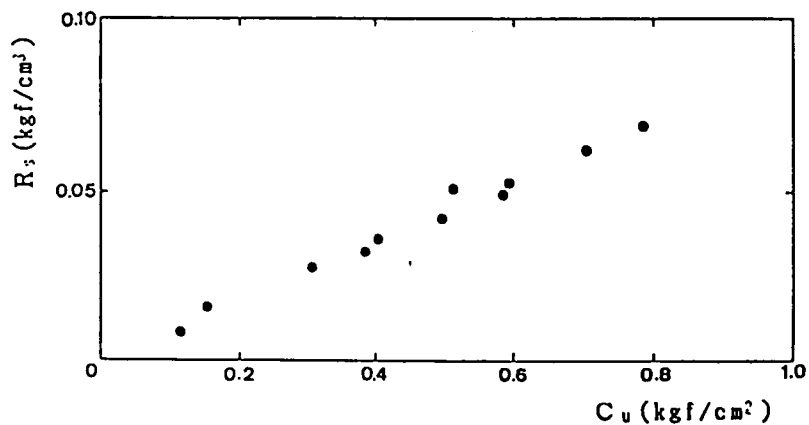


図 3-11a シルトベーンせん断強度 C_u と比掘削抵抗 R_s との関係

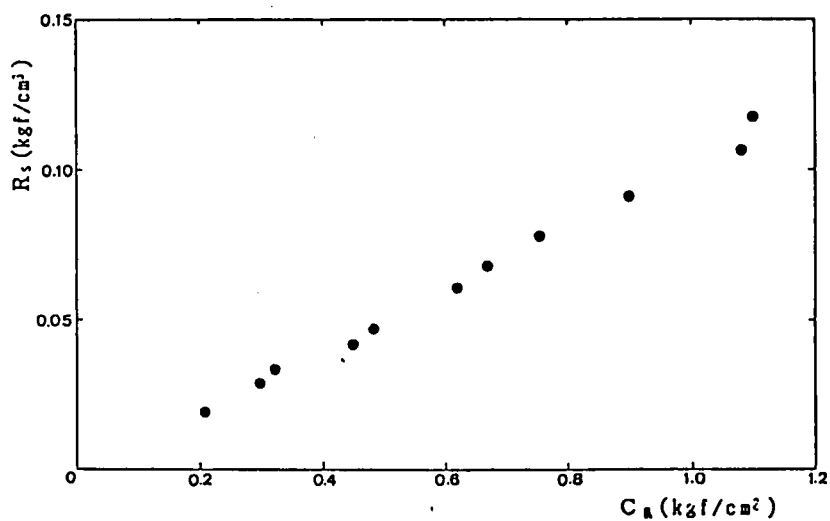


図 3-11b 粘性土ベーンせん断強度 C_u と比掘削抵抗 R_s との関係

実験結果によって両者は次の関係になる。

シルトの場合

$$R_s = 0.0876 C_u \quad (\text{相関係数 } 0.993)$$

粘性土の場合

$$R_s = 0.105 C_u \quad (\text{相関係数 } 0.991)$$

3-5 結論

本章においては畠が提案した土の比掘削抵抗 R_s の測定方法， R_s の利点， R_s と土との力学定数との関係などについて詳述している。

土の掘削抵抗を算出するため，土の比掘削抵抗 R_s 法がある。この方法は現場で簡単に自然地の強度指数を求めることができる。実験結果により土の比掘削抵抗 R_s と掘削抵抗との間には一定の関係がある。したがって，どのような土でもその比掘削抵抗を測定しさえすれば，その掘削抵抗を求めることができる。 R_s 法は次のような利点がある（表 3-1 参照）。

表3-2 c-φ法と R_s 法の比較

	c-φ法	R_s 法
試料採取	不かく乱試料の採取が必要	かく乱試料でよい。特に水底のものは粒度分布を求めれば推定できる
実測方法	実際に掘削破壊時の値が測定できない	実際に即した値が簡単に測定できる
掘削抵抗計算法	きわめて困難	掘削抵抗に正比例するため，簡単に抵抗を算定できる

つぎに，土の比掘削抵抗 R_s と土の力学定数との関係はいくつかがある。

1) 乾燥密度 ρ_d が増せば比掘削抵抗 R_s も増加する。その増加傾向は曲線的である。両者の間に，つぎの関係が成立した。

$$R_s = A \rho_d^B$$

ここに， A ， B は定数である。

2) 実験結果により比掘削抵抗 R_s はコーン貫入抵抗 q_c との間に直線関係がある。その関係はつぎの実験式が成立した。

$$R_s = C q_c$$

ここに， C は定数である。

3) 比掘削抵抗 R_s とベーンせん断強度 C_u との関係は直線になる。すなわち

$$R_s = k_1 C_u$$

ここに、 k_1 は定数である。

4) 比掘削抵抗 R_s と相対密度 D_r との関係は砂の場合には

$$R = (D_{15}/D_{50})^2 (D_{50}/D_{85})$$

を計算することにより、 R_s の最大値を推定することができる¹⁾²⁾。

以上のごとくであり、実験によって検討した結果、 R_s 実験方法は現場で極めて簡単に行いうる試験でその土の比掘削抵抗を求めることができる方法である。それに、 R_s は土の乾燥密度およびコーン指数、ベーンせん断強度によって推定することができる。故に、どのような土でもその比掘削抵抗を求めることができ、掘削性能の解析に貢献するところは極めて大きいと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 畠 昭治郎著：建設機械学，鹿島出版会，pp.151～158,1987年
- 2) 畠 昭治郎：海底砂地盤の掘削とその応用，土木学会論文報告集，第 288号
pp. 127 ～ 137, 1979年
- 3) 畠 昭治郎，安国明：土の比掘削抵抗 R_s について，テラメカニックス，第
6 号，pp.61 ～ 68, 1986年
- 4) 土質工学会：土質調査試験結果の解釈と適用例，昭和 58 年訂正版
- 5) 土質工学会：土質試験法，1984年
- 6) 建設機械と土質：日本工業出版，pp149 ～ 150, 1976年

第4章 油圧式ショベルの掘削実験装置および計測システム

4-1 概説

油圧式ショベルは機械式ショベルから開発されてきたものである。両者は実際に使用される目的は同じであるが、異なるところも多い。たとえば、伝動システム、フロント・アタッチメントなどである。ここで掘削に関する相違について検討する。油圧式ショベルは図4-1，4-2に示すように、アタッチメント構造物（バケット，アーム

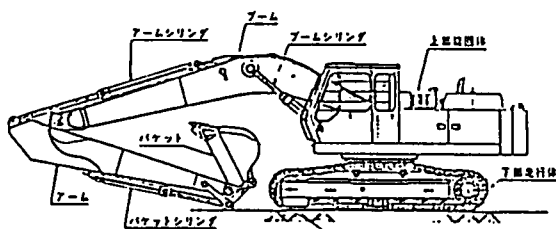


図4-1 油圧式ショベル全体図

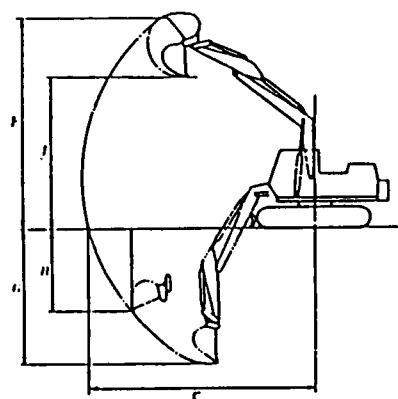


図4-2 油圧式ショベル作業範囲

ム，ブーム）は3本の油圧シリンダと多数のピンで結合された複雑なリンク機構となっている。したがって，3本の油圧シリンダにより，フロントリンク姿勢を大きく変化させることができるためその作業範囲は広く，複雑な動作が可能である。機械式ショベルは図4-3，図4-4に示すように，フロント構造物はロープでつながって働

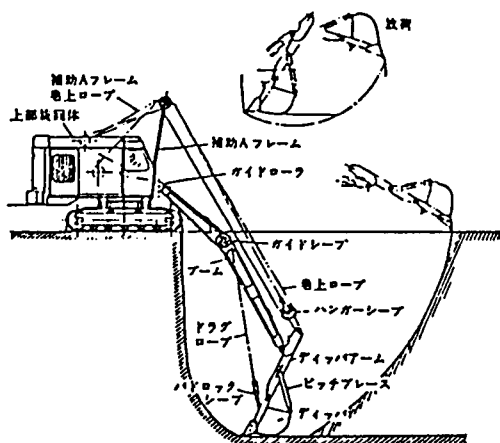


図4-3 機械式ショベル全体図

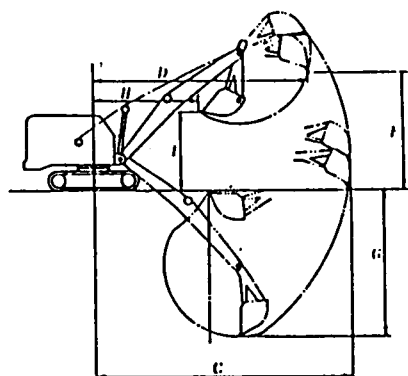


図4-4 機械式ショベル作業範囲

く。故に、油圧式ショベルではバケット、アームおよびブームが単独動作をとることができるし、また、合同動作をとることもできる。すなわち、フロント構造物はいずれも土を掘削することができる。一方、機械式ショベルでは構造のため（バケットはピッチプレースでアームと固定する）、バケットの運動のみで土を掘削することができない。油圧式ショベルに於いてバケットの運動のみで土を掘削する場合には小さな曲率半径（バケット長）により動き、バケット刃先掘削ストロークは短いので、掘削中に掘削角の変化は大きく、掘削深さの変化も大きい。アームで土を掘削する場合には大きな曲率半径（バケット長＋アーム長さ）により動き、バケット刃先掘削ストロークは長いので、掘削中に掘削角の変化は小さい、掘削深さの変化も小さい。以上述べたように油圧ショベルフロント構造物は単独動作をとることができるため、各油圧シリンダが主働的（あるいは、油圧ポンプからシリンダへ注油）に動作することができる、また、受働的（外力を受るとシリンダ内の油がタンクへ逃油）に動作することができる。したがって、土を掘削するとき、油圧ショベル掘削能力は掘削抵抗の影響を受けるほか、機械自体のいろいろな制限要素を受ける。制限要素について第7章に詳細に述べることにする。

本章においては本研究用の掘削実験装置を設計するにあたって、掘削中、バケットにかかる掘削抵抗の大きさ、方向および着力点などを正確に把握するため、油圧式ショベル機械自体の制限要素を全部除いて、土質条件の影響および掘削条件などを考えてみる。

4-2 掘削実験装置製作の目的

建設機械の中で土の掘削、運搬などを作業目的とするものを土工機械とも呼び、その代表例としては油圧ショベル、ブルドーザなどが挙げられる。これらの土工機械の土工装置（あるいは掘削装置）はすべてその刃先で土の掘削を行っている。油圧ショベルが土を掘削するときの掘削抵抗の大きさ、方向および着力点の位置がどのようになるのか、今まで、解明、把握していなかったのが実状である。土の掘削抵抗問題を解明する方法として2つの方法がある。1つは現場実験である。これは実際掘削作業における掘削抵抗を計測するものである。もう1つは室内実験である。室内実験では

掘削装置の模型を用いて掘削実験を行って掘削抵抗を計測するものである。従来，前者はある会社がたまに計測したが，後者はしていない。現場で実際掘削抵抗を計測するときは掘削抵抗の大きさだけは計測することができるが，抵抗の方向，着力点の位置はわからない。本研究用に製作する掘削実験装置は室内での掘削現象で生じる力学的諸量，すなわち，実験試料の種類がちがひ，掘削条件（掘削角度，掘削深さ，掘削速度など）がちがひによって，掘削抵抗の大きさとその方向，バケット上の着力点の位置などがどのように変化するかを，実際に土の掘削を行って明らかにするものである。

4-3 本研究用掘削実験装置の構造

本研究で製作した実験装置を図4-5に示す。この実験装置の構成要素には4つの部分がある。すなわち，駆動装置，伝動装置，掘削装置（バケット）および計測システムである。

駆動装置は三相誘導電動機と変速機から成り立っている。電動機と変速機とは直結しており，三相誘導電動機出力は1.5KWで，回転数は1700rev/min（60Hz）である。変速機の性能は表4-1に示す。

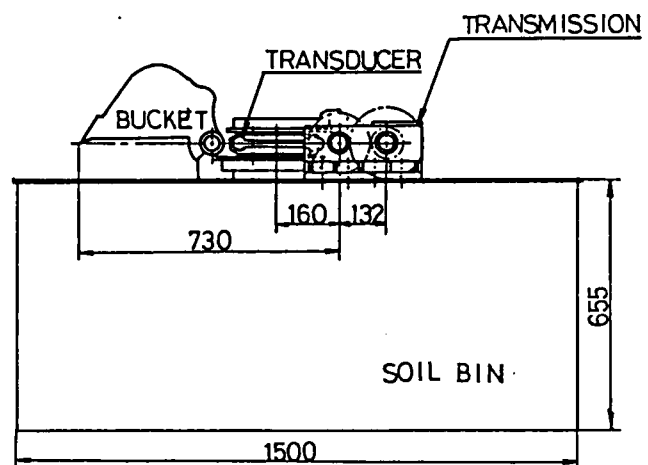


図4-5 実験装置

表4-1 変速機の性能

形 式	変 速 範 囲	出力軸回転数 (rev/min)	出力軸トルク (kgf・m)
SCM - 1500B・G3	1 / 45.33 ~ 1 / 11.33	37.5 ~ 150	38.96 ~ 9.74

伝動装置はスプロケット，ローラチェーン，平歯車などから成っている。この伝動装置の伝動システムを図4-6に示す。伝動システム減速比は $i = Z_2 \cdot Z_4 \cdot Z_6 \cdot Z_8 \cdot Z_{10} \cdot Z_{12} \cdot Z_{14} \cdot Z_{16} / Z_1 \cdot Z_3 \cdot Z_5 \cdot Z_7 \cdot Z_9 \cdot Z_{11} \cdot Z_{13} \cdot Z_{15} = 35 \times 60 \times 75 \times 60 / 20 \times 18 \times 18 \times 28 = 52.08$ である。

掘削実験装置全体の（電動機からバケットまで）性能は表 4 - 2 に示す。

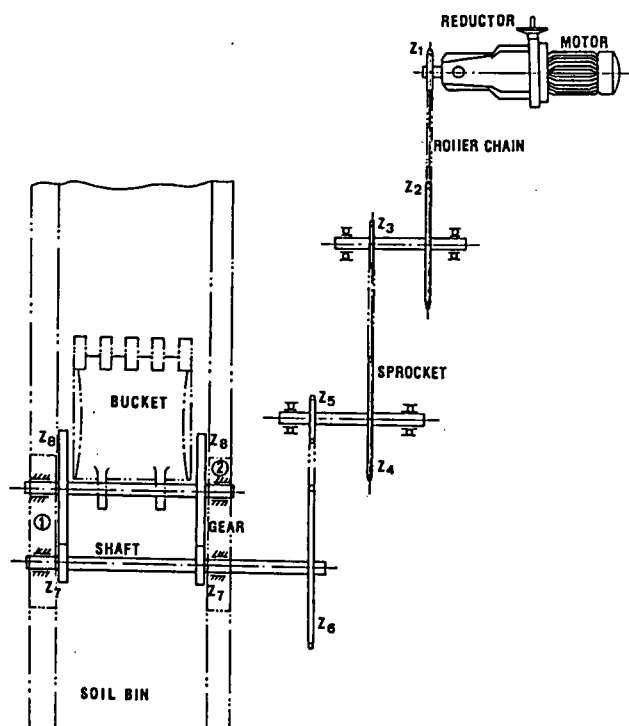


表 4 - 2 掘削実験装置の性能

減速範囲	1/2360.79 ~ 1/590.24
回転数 (rev/min)	0.72 ~ 2.88
トルク (kgf・m)	2028.89 ~ 507.26
掘削線速度 (m/sec)	0.055 ~ 0.22

図 4 - 6 掘削実験装置駆動及び伝動システム

掘削装置はバケットとピンから成り立っているものである。バケットの寸法については、相似条件を完全に満足させることが困難である関係上、できるだけ実物に近い寸法のも

が望ましい。今回の実験では0.5m³ 級の中型油圧ショベルのバケットに対して縮尺比が1/3 の縮尺模型に相当するものである（図 4 - 7 に示す）。バケット爪の要素モデルは図 4 - 8 のようになっている。爪はボルトでバケットと連結している。取付方法（爪は刃先が上、または、下の取付方法があり）によって掘削角が異なる。その目的は；①掘削角が掘削抵抗にどのような影響を与

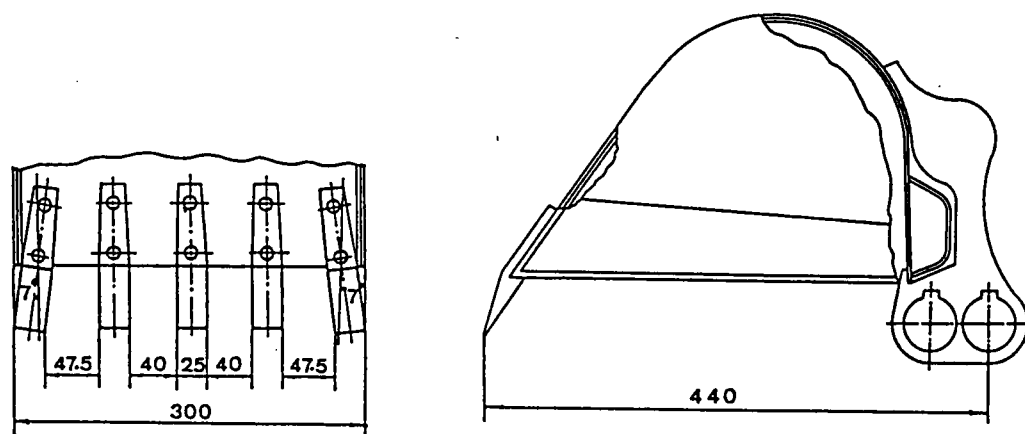


図 4 - 7 バケットモデル

えるか。②爪の間隔が変ると、掘削抵抗にどう影響をするか。③爪のある場合、または、ない場合（爪のある場合と同じ半径するように補充材つきの）には掘削抵抗に影響を与えるかどうかなどを検討するものである。

掘削による土の変形および土とバケットとの働きを知るために、小形土槽による掘削実験を行った。実験に使用

した土槽は図4-5に示す小形土槽である。この小形土槽の内のは長さ1500mm，幅475mm，深さ655mmである。また，土槽3側壁は4mm鋼板補充材ついで囲んだが，正面には厚さ10mmの透明なアクリル製窓を設けた。その目的は掘削によって土がどのように変形するかを検討するためである。土槽の上に（両側）支え装置を取付ている。掘削中にバケットは145°まで回転できる。また，土を締固めるために，自重35kgf，起振力42.58kgf底板面積300mm×500mmの振動締固め機を備えた。

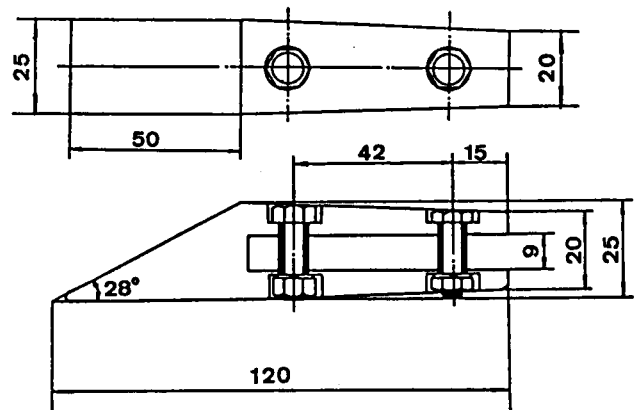


図4-8 バケット爪モデル

4-4 計測システム

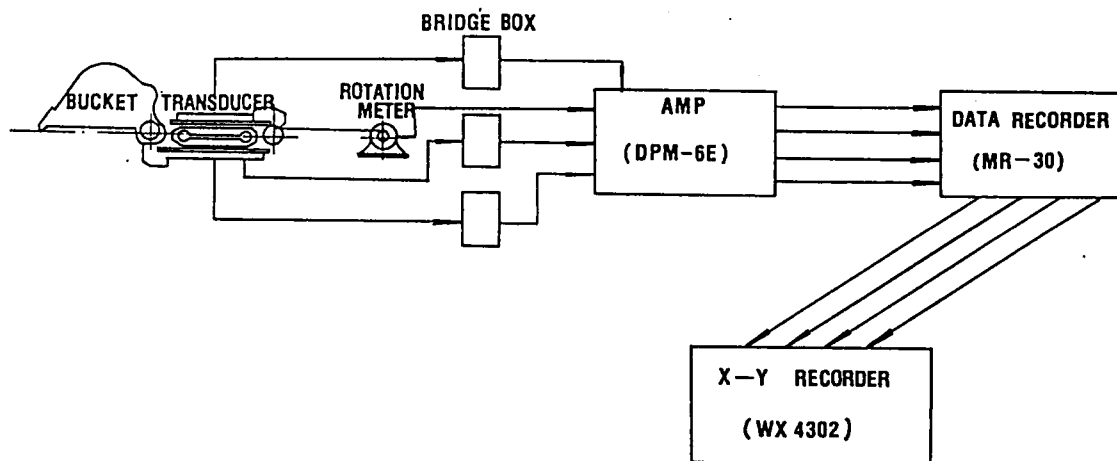


図4-9 計測システム

本研究において模型バケットの掘削抵抗を測定するシステムを図4-9に示す。掘

削中，バケット刃先にかかる掘削抵抗の刃先の運動方向に対する，切線成分 (F_t)，法線成分 (F_n) およびその着力点を正確に把握するために八角形分力計を使用した。八角形分力計を使用する前にキャリブレーションした。その結果は各値とも $\pm 2 \sim 3$ % の誤差がある。したがってこの八角形分力計は十分実用に供せられるものであることがわかった。この八角形分力計を介してバケットにかかる掘削抵抗の切線成分および法線成分の二分力，ならびにその平面内のモーメントを同時に測定できる。バケットと八角形分力計との取付方法を図 4-10 に示している。図 4-11 はその原理と接続方法である。1) 2) 3)

本研究用三成分力計は掘削実験装置がバケットで土を掘削するとき，バケットにかかる掘削抵抗の大きさ、方向、着力点および掘削抵抗変化などを判明するために製作し

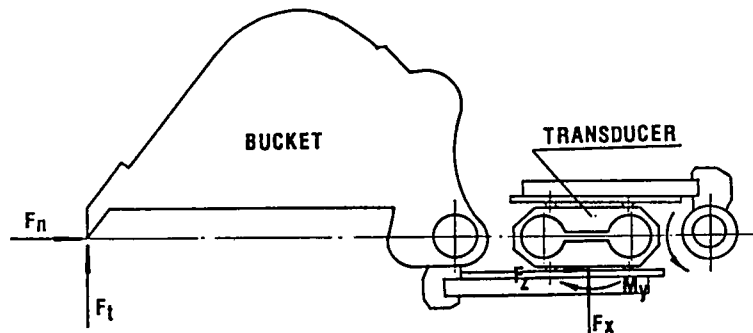


図 4-10 掘削抵抗測定用八角形分力計

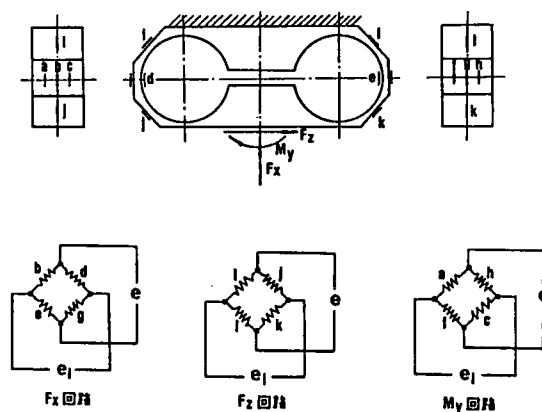


図 4-11 掘削抵抗測定用八角形分力計原理図

たのものである。バケットは連接板と八角形分力計を介して伝動装置の左，右側掙架①，②（図4－6参照）と連接する。左，右側掙架はボルトで土槽両側壁上に取付ける（図4－5，4－6，4－9参照）。電動機は無段変速機，スプロケット，ローラチェーン，歯車を介してバケットを回転して掘削実験を行った。変速機の変速比を変えると，バケットの掘削速度も変化する。回転計を用いて掘削するとき回転角を計測する。八角形分力計を用いて掘削中のバケットにかかる抵抗の大きさ，方向および着力点を計測し，データレコーダに記録し，X－Yレコーダに出力させる。

参考文献

- 1) 渡辺理著：ひずみゲージとその応用，日刊工業新聞社，1968年
- 2) 共和電業：DPM-E携帯型ひずみ測定器取扱説明書，1973年
- 3) 共和電業：共和ゲージとその取扱法，1976年

第5章 砂の掘削抵抗に関する実験結果，考察および解析

5-1 概説

油圧ショベルの掘削作業において，掘削装置（バケット）部分と土砂との間の相対運動に伴って発生する抵抗は，土砂間相互の複雑な諸条件に支配されるために，理論的にその機構を解明することは非常に困難である。しかし，実際問題として土の掘削現象を究明しておくことは作業能率の良し，信頼性の高い機械を製作する上で重要な課題である。しかしながら現状では，古くから問題提起がなされているにもかかわらず，土そのものが研究対象として扱いにくいいため，この種の系統的研究はなされておらず，建設機械の設計にただちに応用できる成果は少ない。そこで土の挙動に合致した優れた掘削機械を見出すことを最終目標として，特に油圧ショベルによる土の掘削にかかわる現象を解明する必要がある。

ここでは，まず，砂に対する，掘削条件（掘削角度，掘削深さ，掘削速度など）の相異により，また，掘削装置（爪なし，爪あり，爪の本数など）の相異によって，掘削中に生じる掘削抵抗の大きさとその方向，バケット上の着力点の位置などのついて実際に掘削実験を行った。さらに，砂の掘削抵抗の特性を明らかにした。最後に掘削抵抗にばす諸特性に関する実験的考察を行った結果について述べる。

5-2 実験方法

5-2-1 実験研究内容

土槽内の砂のバケット掘削実験で，次の実験を行った。

- (1) 砂の変形；掘削中の砂のうごき（パターン）。
- (2) バケットにかかる力；掘削抵抗の大きさ，方向，着力点の位置。

実験の全体を通じて，掘削半径が 730 mm のとき，変化させたパラメータは次のとおりである。

(a) バケットの刃先には全部 5 本の爪が取付けてあり，その位置は図 5-1 に示したとおりである。

(b) バケットの刃先間隔の変化および本数の影響。すなわち，5 本と 3 本。

(c) 爪の取付け方は図5-1 a, bに示す。

(d) 爪の有無（爪なし時は爪のある場合と同じ半径するように補充材つくる）。

(e) 掘削深さを变化させる。

(f) 掘削速度を变化させる。

なお，具体的な実験条件を表5-1に示している。

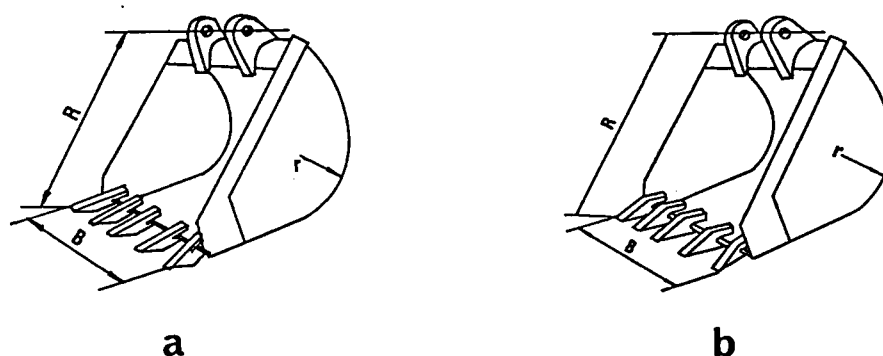


図5-1 バケットと実験用爪の取付方法

表5-1 掘削条件

掘削幅 B (mm)	掘削速度 V (m/sec)	掘削半径 R (mm)	最 大 掘削深さ t (mm)	爪					知ろうとする項目
				5本	なし	3本	図5-1a	図5-1b	
300	0.055	730	230	*			*		掘削深さの影響
300	0.055	730	185	*			*		
300	0.055	730	160	*			*		
300	0.055	730	120	*			*		
300	0.055	750	225	*			*	*	爪取付方法の影響
300	0.055	720	200		*				掘削半径の影響
300	0.055	745	200		*				
300	0.055	770	200		*				
300	0.055	440	150	*			*		爪数の影響
300	0.055	440	150			*	*		
300	0.0254	440	150	*			*		掘削速度の影響
300	0.142	440	150	*			*		

5-2-2 実験用試料

実験に使用した試料は豊浦標準砂（以下標準砂と略す）である。標準砂の粒径加積曲線を図5-2に，土質力学的な性質を表5-2に示す。

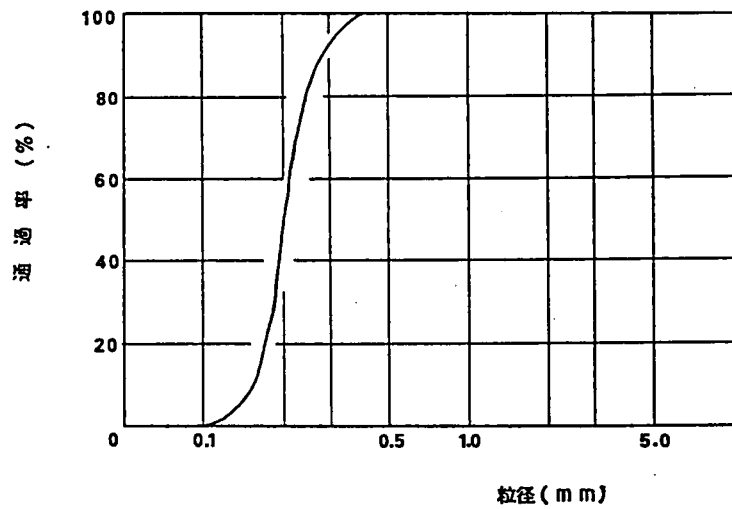


図 5 - 2 標準砂の粒径加積曲線

表 5 - 2 実験に使用した砂の性質

比 重		2.63
粒度分布	均 等 係 数	1.3
	平均粒径 (mm)	0.21
含 水 比 (%)		3.70 ~ 4.25
乾燥密度 (g/cm ³)		1.4102 ~ 1.4365
内部摩擦角 (deg) (一面せん断による)		32.5 ~ 33.5
比掘削抵抗 (kgf/cm ³)		0.0141 ~ 0.0148

5 - 2 - 3 掘削装置（バケット）の寸法

掘削装置（バケット）の寸法については，相似条件を完全に満足させることが困難である関係上，できるだけ実物に近い寸法のものが望ましい。しかし，設備に制限があるため今回の実験では，バケットの幅を300mmとした。これはバケット容量 0.5m³の中型油圧ショベルに対しては縮尺比が 1/3 の縮尺模型に相当する。Rの値は 440 mmとなり，rは 120 mmである（図5 - 1 参照）。

5-2-4 実験方法

実験用試料砂を一定の厚さ（一回ごと約50mm）で、土槽中にまき出し、一定時間振動器で締め固める。掘削実験直前に特製のブレードにより表土部分を削取って、土槽中の砂が所定の掘削深さになるようにする。以上の準備を終った後、以下の仕事を順番にする。

- （1）土槽内の4カ所（前の左、右と後の左、右）の砂を取って、含水比と密度を測る。
- （2）土槽の前方で比掘削抵抗 R_s を測定する。
- （3）バケットを水平状態に調整する。
- （4）各計測器を入力状態にする。
- （5）掘削実験開始、同時にバケットにかかる抵抗力は掘削抵抗測定用三成分力計により、三成分力計に対する水平ならびに垂直の二抵抗分力およびモーメントがデータレコーダに記録される。
- （6）掘削実験終了後、土槽中の砂を全部外に出す。
- （7）外に出した砂の含水比を一定に保つためビニールシートなどでできるだけ密封しておく。

5-3 バケットにかかる抵抗

油圧ショベルで土を掘削する際にバケットの刃先と土が触れ合う。触れ会ったところに大きさが相等しく、方向が逆の力にかかる。すなわち、1つはバケットの土に対する掘削力であり、もう1つはその力の反力であるところの掘削抵抗である。

バケットで土を掘削する場合は次のような外力を生じる（図5-3に示す）。

- ①油圧シリンダの内部抵抗（ R_c ）
- ②各機構の内部抵抗（ R_p ）
- ③バケットの外底面と地面との間の摩擦抵抗（ F_1 ）
- ④バケットの外側面と地面との間の摩擦抵抗（ F_2 ）
- ⑤バケット内土砂とバケット内底面との間の摩擦抵抗（ F_3 ）
- ⑥バケット内土砂とバケット内側面との間の摩擦抵抗（ F_4 ）

⑦土の内部摩擦力 (F_5)

⑧土の貫入抵抗 (F_6)

⑨土の掘削抵抗 (F_8)

実際問題として、機械自体の問題を除く、
③～⑦の抵抗の測定は非常に困難である。故
に、今回実験中の抵抗の測定処理として次の
仮定を行うことが妥当と思われる。すなわち、
③～⑦、⑨の抵抗を抵抗の和で表わし、切線
掘削抵抗とし、 F_6 の抵抗を法線抵抗とする。

5-4 実験結果および考察

砂質土について、土槽中の掘削による掘削
抵抗の大きさ、その方向およびモーメントの
値が種々の変数に対して求められたが、これ
を整理して述べる。なお、下記に示す諸記号
を用いる（図5-4参照）。

F_t : 掘削抵抗切線分力（切線抵抗とも
いう）(kgf)

F_n : 掘削抵抗法線分力（法線抵抗とも
いう）(kgf)

H_α : 掘削抵抗水平分力（水平抵抗とも
いう）(kgf)

V_α : 掘削抵抗垂直分力（垂直抵抗とも
いう）(kgf)

R : 掘削抵抗合力 (kgf)

θ : バケットの回転角 (deg)

α : すくい角 (deg)

ψ : 掘削角 (deg)

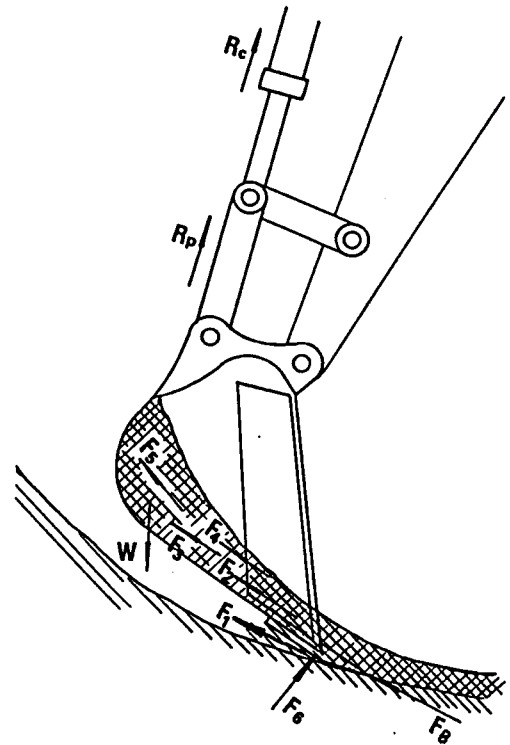


図5-3 掘削時のバケットにかかる抵抗

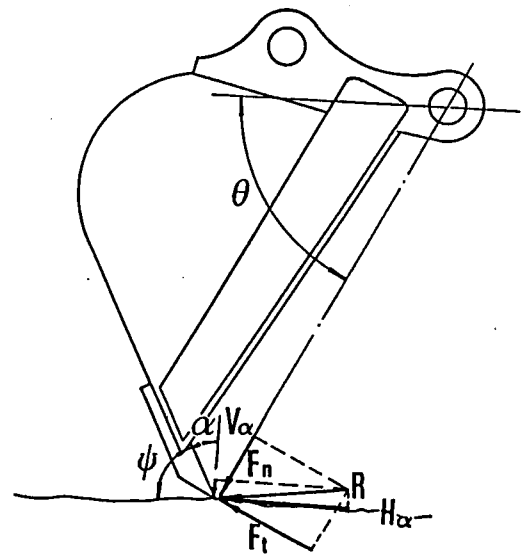


図5-4 働く力のモデル

B: バケット幅 (cm)

t: 掘削深さ (cm)

X: 掘削行程, 掘削水平距離 (cm)

R_s : 土の比掘削抵抗 (kgf/cm^3)

5-4-1 掘削抵抗の切線成分 F_t と法線成分 F_n

掘削実験によってバケットにかかる掘削抵抗の切線成分 F_t とバケット回転角 θ との関係を図5-5, 法線成分 F_n とバケット回転角 θ との関係を図5-6, 掘削抵抗モーメント M_y とバケット回転角 θ との関係を図5-7に示す。これらは掘削実験結果の一例である。横軸はバケット回転角を, 縦軸は切線抵抗 F_t , 法線抵抗 F_n および抵抗モーメント M_y それぞれを表わす。実線は掘削中バケットにかかる抵抗を, 二点鎖線はカラ運転状態でバケット自重による変化を, 破線はバケット掘削軌跡を表わすものである。掘削抵抗はバケットにかかる抵抗からカラ運転状態バケット自重の変化を減じたものである。これらの実験結果によれば掘削深さ t の増加とともに各抵抗

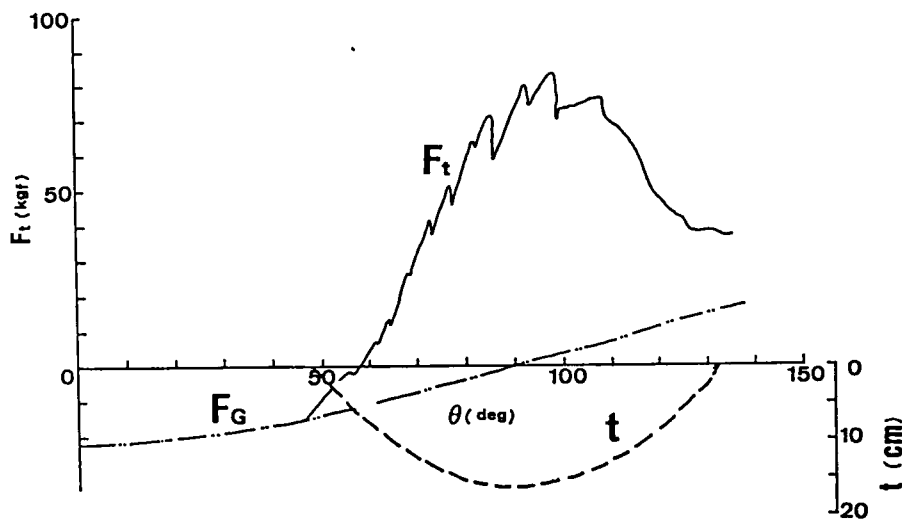


図5-5 切線抵抗 F_t とバケット回転角 θ の関係

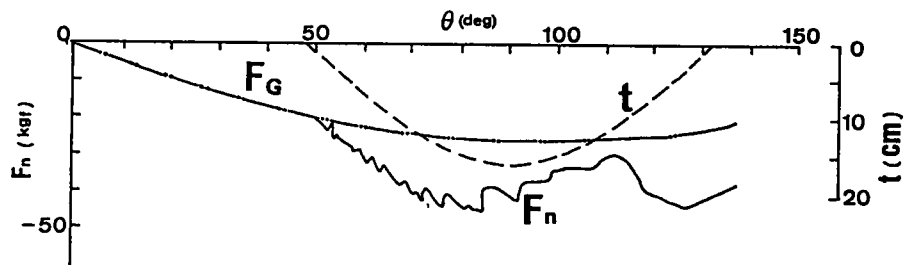


図 5-6 法線抵抗 F_n とバケット回転角 θ の関係

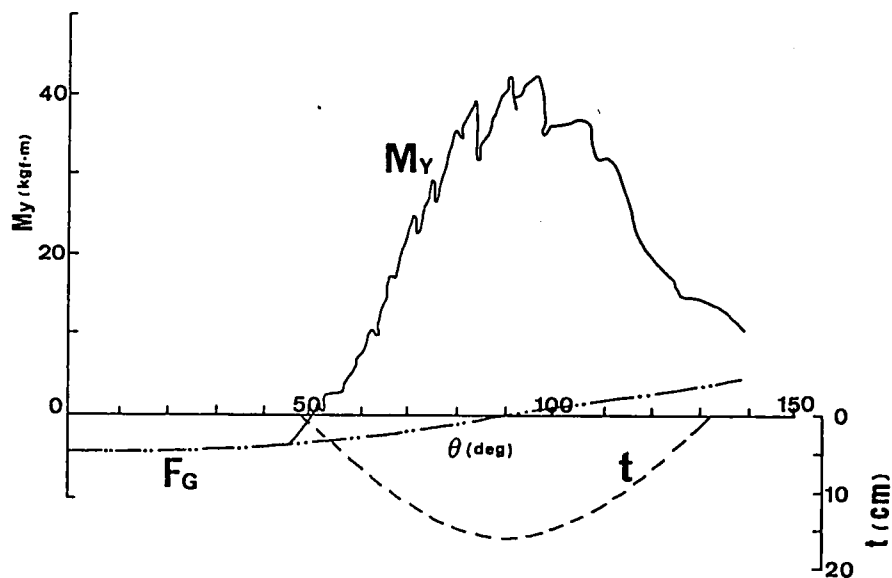


図 5-7 掘削抵抗モーメント M_y とバケット回転角 θ の関係

が増加しているが、切線抵抗 F_t の立上りが法線抵抗 F_n の立上より大きい。切線抵抗 F_t はバケット回転角約 90° ぐらい（最大掘削深さ）前に掘削深さ t の増加するにつれて急に増加し、また、波形が相当に激しく揺れている。バケット回転角約 90° ぐらい（最大掘削深さ）後に切線抵抗 F_t は掘削深さ t が減るとともに減少し、また、その減少は極めてなめらかに変化している。その理由は砂質土では掘削深さの増加とともに土のすべり破壊領域が大きく、最大掘削深さ以後は土の内部組織がすべて破壊されたことによるものと考えられる。

一方，切線抵抗 F_t と法線抵抗 F_n の関係について実験結果のうち 2 例を図 5-8 に示す。これらの結果によると，この 2 つ抵抗間に顕著な関係は認められないが，つぎのことがわかった。掘削開始階段にこの 2 つ抵抗の比は大きく，掘削深さ t （すなわち，バケット回転角）の増加とともにその比は小さくなる。最大掘削深さ t に達する前後，その 2 つ抵抗比は一番小さい。掘削を続けると，最大掘削深さ t を越えて，掘削深さ t の減少とともに，その比はまた大きくなる傾向が認められる。

5-4-2 掘削抵抗と掘削深さとの関係

掘削抵抗と掘削深さとの関係を調べるために，掘削深さ t を種々に変化させる場合の関係について実験的考察を行った。最大掘削深さ t を 120mm, 160mm, 185mm, 200mm, (2 回), 220mm, 225mm, 230mm の 8 種類に変化させて掘削を行い，各掘削深さ t に対する各抵抗値を実測した。本節では，主としては掘削深さ t を変えることによって，切線抵抗 F_t がどのように変るかについて，定性的な傾向を見出すことを目的とした。図 5-9 には切線抵抗 F_t と掘削深さ t との関係について実測した結果を示したものである。図 5-9 に示されるように，掘削深さ t が増せば掘削抵抗の切線成分 F_t も増

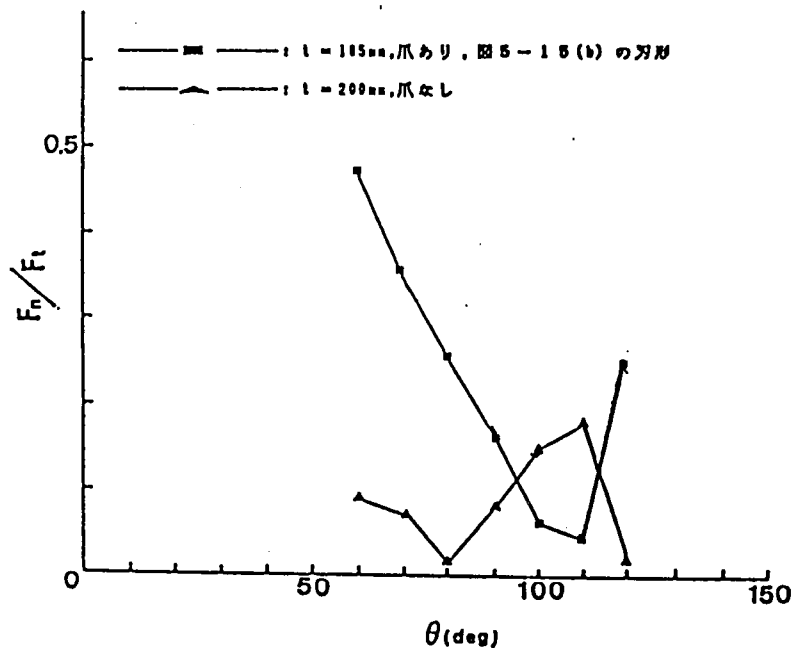


図 5-8 F_t と F_n との関係

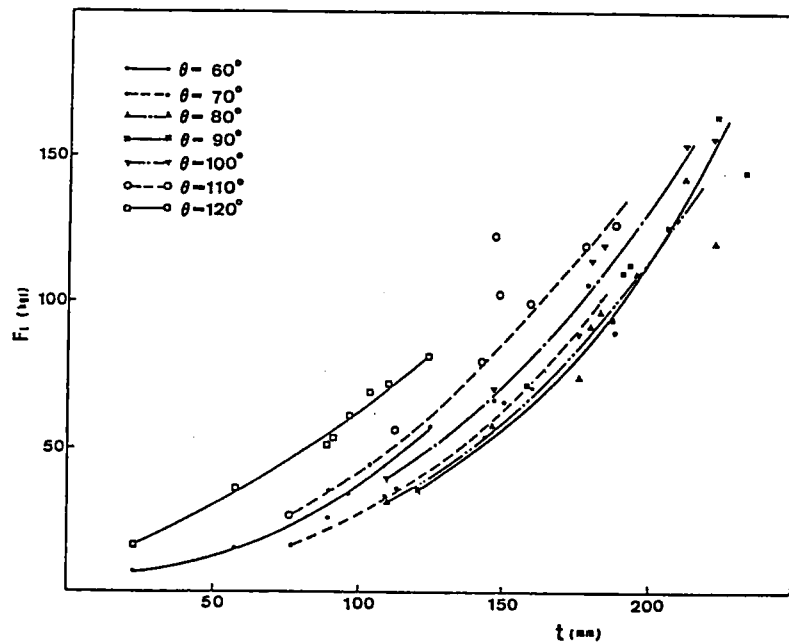


図 5 - 9 切線抵抗 F_t と掘削深さ t との関係

加する。その増加傾向は砂質土では放物線的であるが、バケット回転角 90° （最大掘削深さ）前の放物線はよく曲るであり、バケット回転角 90° （最大掘削深さ）後の放物線はなだらかことがわかった。この現象になる理由はまず、砂の場合には粘着力はない、掘削中に摩擦抵抗の原因のため、放物線になるのである。つぎに、バケット回転角 90° 前にバケットが回転しながら掘削を続けて砂のすべりもつづく。このすべり破壊領域が大きくなるため、未掘削の土に影響する。故に、バケット回転角 90° 後には土のすべりがあまり起こらないため、バケットに入れた土の重量だけの影響を受けのため、バケット回転角 90° 前の放物線はバケット回転角 90° 後の放物線よりよく曲ることであると考えられる。故に、砂の場合には掘削抵抗は掘削深さ t の 2 乗に比例するからである。

5 - 4 - 3 掘削抵抗と掘削速度との関係

図 5 - 10 は掘削抵抗モーメントと掘削速度の関係を示したものである。図で実線は掘削速度 0.142m/sec とし、破線は掘削速度 0.035m/sec としたものである。実測結果によると、砂質土に対しては、掘削抵抗は掘削速度と殆んど無関係である。図によって掘削速度が変わると、掘削抵抗が多少変化しているのは実験誤差と考えられる。

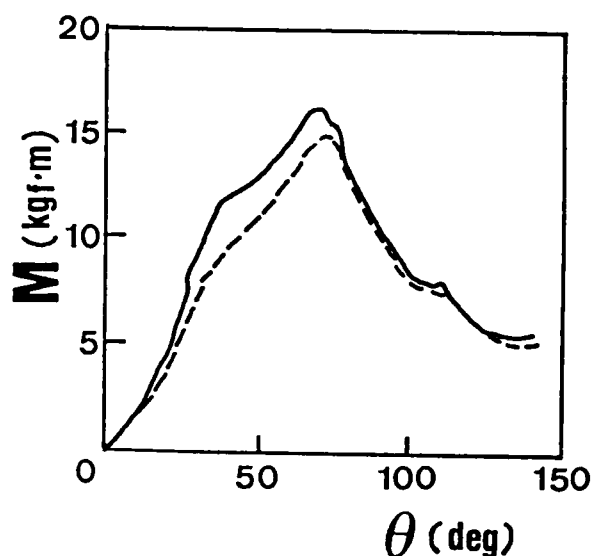


図 5 - 1 0 掘削抵抗と掘削速度との関係

5 - 4 - 4 掘削抵抗と爪数との関係

バケットに爪をつける目的は掘削抵抗を減らすためである。しかし，爪のすき間が狭すぎると，爪先単位幅当りの押込圧力が小さくなってくい込みが悪くなり，あまりすき間が大きいと，爪と爪との間に破壊されない土の部分が残って，かえって掘削能率がおちて，掘削抵抗が大きくなる。その中間に最も能率のよいすき間というものがあるはずである。そのために，今回実験中に掘削深さと比掘削抵抗 R_s をほぼ一定に保持して，爪のすき間の変化，爪の有無が掘削抵抗にどのような影響を与えるのかについて実験を行った。

今回実験に使用した爪の幅は25mmであり，5つ爪をつけた場合には爪と爪とのすき間は中央の3本は40mmと両端は47.5mmである。その略図は図5-11に示す。

図5-12は掘削抵抗モーメントと爪数との関係を示したものである。図5-12で実線は5本爪をつけた場合の掘削抵抗モーメントであり，破線は3本爪をつけた場合の掘削抵抗モーメントである。5本爪をつけた場合には爪のすき間と爪幅との比は1.6と1.9である。3本爪をつけた場合には爪のすき間と爪幅との比は4.5倍になった。実験結果により，砂質土では爪数が変わっても掘削抵抗があまり変わらないことが認められた。

一方，爪の有無の場合に掘削抵抗はどのように変わるかについて実験を行った。図5-13に示したものは掘削抵抗切線成分 F_t と爪の有無との関係であり，図5-14 a（爪のある），b（爪のなし）に示したものは掘削抵抗法線成分 F_n と爪の有無との関係である。図5-13には実線は5本爪をつけた場合の掘削抵抗切線成分 F_t の変化を示したものであり，破線は爪のない場合の掘削抵抗切線成分 F_t の変化を示した

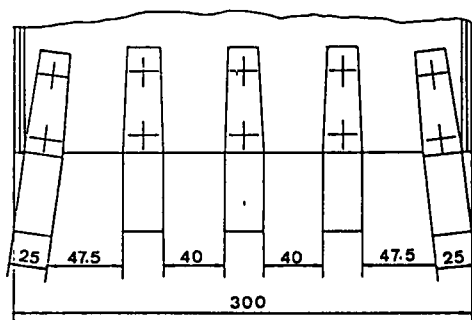


図5-11 実験用爪の取付け場所

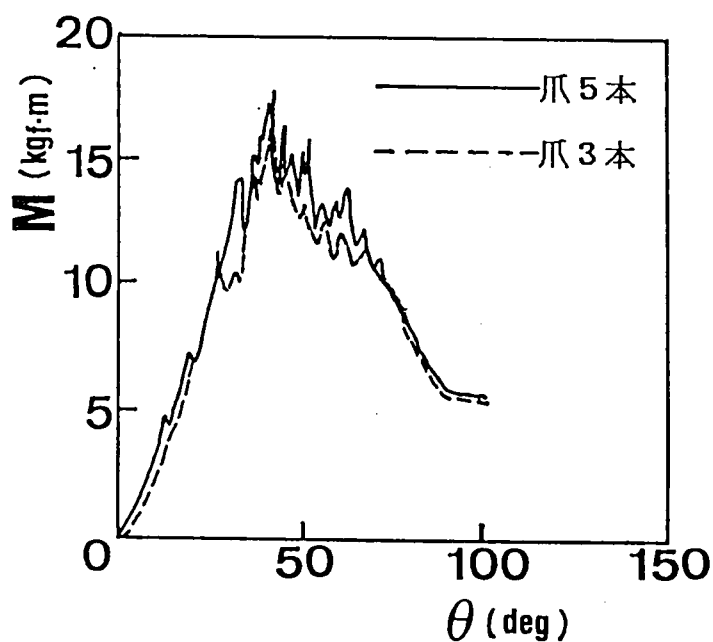


図5-12 掘削抵抗モーメントと爪数との関係

ものである（実験にあたって掘削深さ t ，比掘削抵抗 R_s がほぼ等しい）。爪のないの場合と爪のある場合の切線抵抗 F_t は掘削深さ t とともに両方とも増加するが，爪のないの場合の切線抵抗 F_t は爪のある場合の切線抵抗 F_t より大きい。その増加率はバケット回転角によって異なるが，最大掘削深さ前後のところには掘削抵抗切線

成分 F_t の増加率は約1.37倍に達することが認められる。

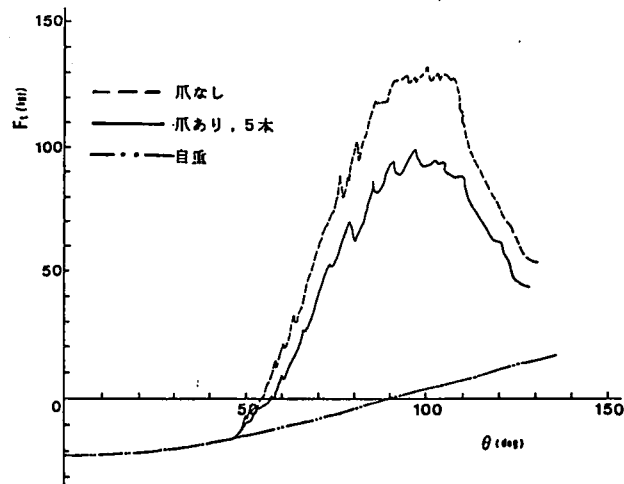


図 5 - 1 3 掘削抵抗 F_t と爪の有無との関係

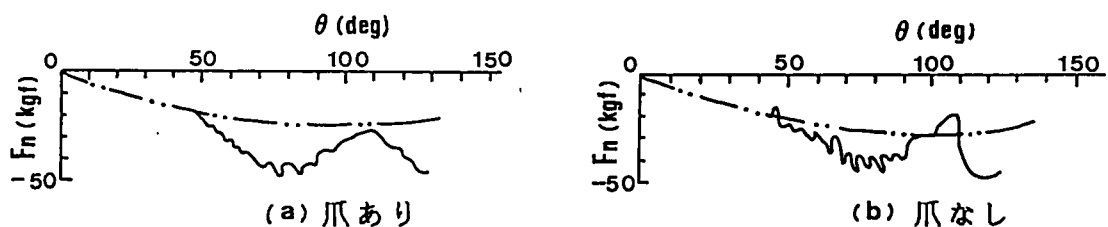


図 5 - 1 4 掘削抵抗 F_n と爪の有無との関係

図 5 - 1 4 (a) は爪あり, (b) は爪なしの場合の掘削抵抗法線成分 F_n の変化である。この図を参考すれば爪あり, 爪なしの場合の掘削抵抗法線成分 F_n の最大値はほぼ等しい値を示す。その抵抗の方向は両方とも掘削深さとともに時々変化するが, 爪なしの場合は爪ありの場合にくらべて抵抗方向変化が極めて激しい。故に, 掘削抵抗法線成分 F_n の方向が変わると, 合力の方向も変わる。このことについて次節で述べる。

5-4-5 掘削抵抗と爪形との関係

実際掘削作業を行う場合は硬土や砂利まじり土などをとり扱うため、くい込みをよくするために数本の爪を用いるのが普通である。爪を用いることにより、強大な掘削力を爪の先端に集中せしめて掘り易くする。前節で爪数の変化、爪の有無と掘削抵抗との関係などが明らかになった。本節では爪の形（刃先形状）変化による掘削抵抗の変化について実験を行った。

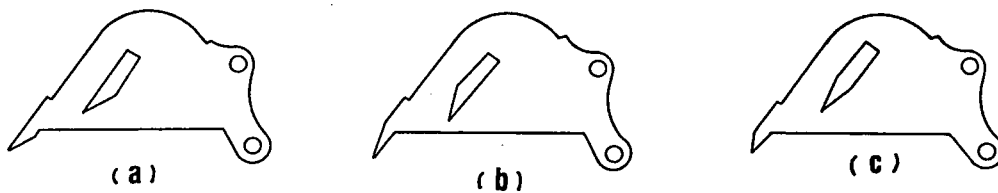


図 5-15 バケットにつける爪形モデル

現実には油圧ショベルのバケットにつける爪形はまとめて約3種類である（図5-15参照）。図5-15（a）、（b）は小型ショベルとミニショベルのバケットに使用する爪形であり、（c）は中型ショベルと大型ショベルのバケットに使用する爪形である。設備に制限があるため今回の実験では（a）と（b）の爪形を使用することにした。具体的な寸法は図4-8に示すとおりである。

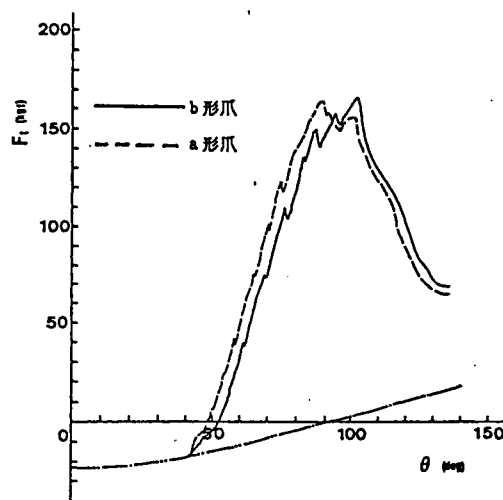


図 5-16 掘削抵抗 F_t と爪形との関係

爪形が異なると、掘削角も異なる。砂では掘削角が変われば、掘削抵抗が変化するかどうかについて実験を行った。図 5-16 に示したものは掘削抵抗切線成分 F_t と爪形との関係である。図中破線は図 5-15 (a) の爪形の掘削抵抗の変化であり、実線は図 5-15 (b) の爪形の掘削抵抗の変化である。図 5-16 に示すように、爪形が変わっても最大掘削抵抗は変化していないことが認められる。しかし、爪形が変わると掘削抵抗のあらわれ方が異なる。(a) 形爪の掘削抵抗は (b) 形爪の掘削抵抗より 10° ぐらい早めにあらわれることがわかった。故に、砂質土では掘削角の変化は全体的には掘削抵抗に影響しないが、同じバケット回転角でみれば掘削抵抗に影響を当てることは明らかになった。

5-4-6 掘削抵抗の方向および着力点の位置

油圧ショベルにとって最も重要な意味をもつのは掘削抵抗の切線分力 F_t である。これは油圧ショベルを設計するにあたり、その機械の性能を決定する最大のテーマでもある。一方、掘削時には刃先に集中力が作用する。すなわち、掘削抵抗合力の着力点の位置について正確に把握することが問題になる。そのための掘削実験を行った。

前節に述べたように、掘削抵抗の切線成分 F_t の大きさはいろいろな条件によって異なるが、その方向はいつもバケットに向く（図 5-4 参照）、掘削抵抗の法線成分 F_n の大きさもいろいろな条件によって異なり、その方向も異なる。時々バケット回転中心に向き、時々外に向く、故に、掘削抵抗の合力の方向も変る。そこで 1 例としてバケットについて切線抵抗 F_t 、法線抵抗 F_n およびモーメントを計測し、その結果から掘削抵抗の合力とその着力点を計算で求めてたのが図 5-17 である。

図 5-17 に示したものは正常な掘削条件で実測して整理した結果である（正常な掘削条件というのは①バケットに 5 本爪をつけ、②爪形は図 5-15 の (a) に示す通りである）。図 5-17 から掘削抵抗の合力の方向はバケット回転角とともに変化するが、その作用方向は反時計回りに変化してゆくことが判明した。

掘削抵抗の合力の着力点の位置について砂の場合にはバケット回転角とともに着力点は刃先からバケット上方に移動する。着力点は移動しても刃先の付近、あるいは、刃先の上にあることがわかった。

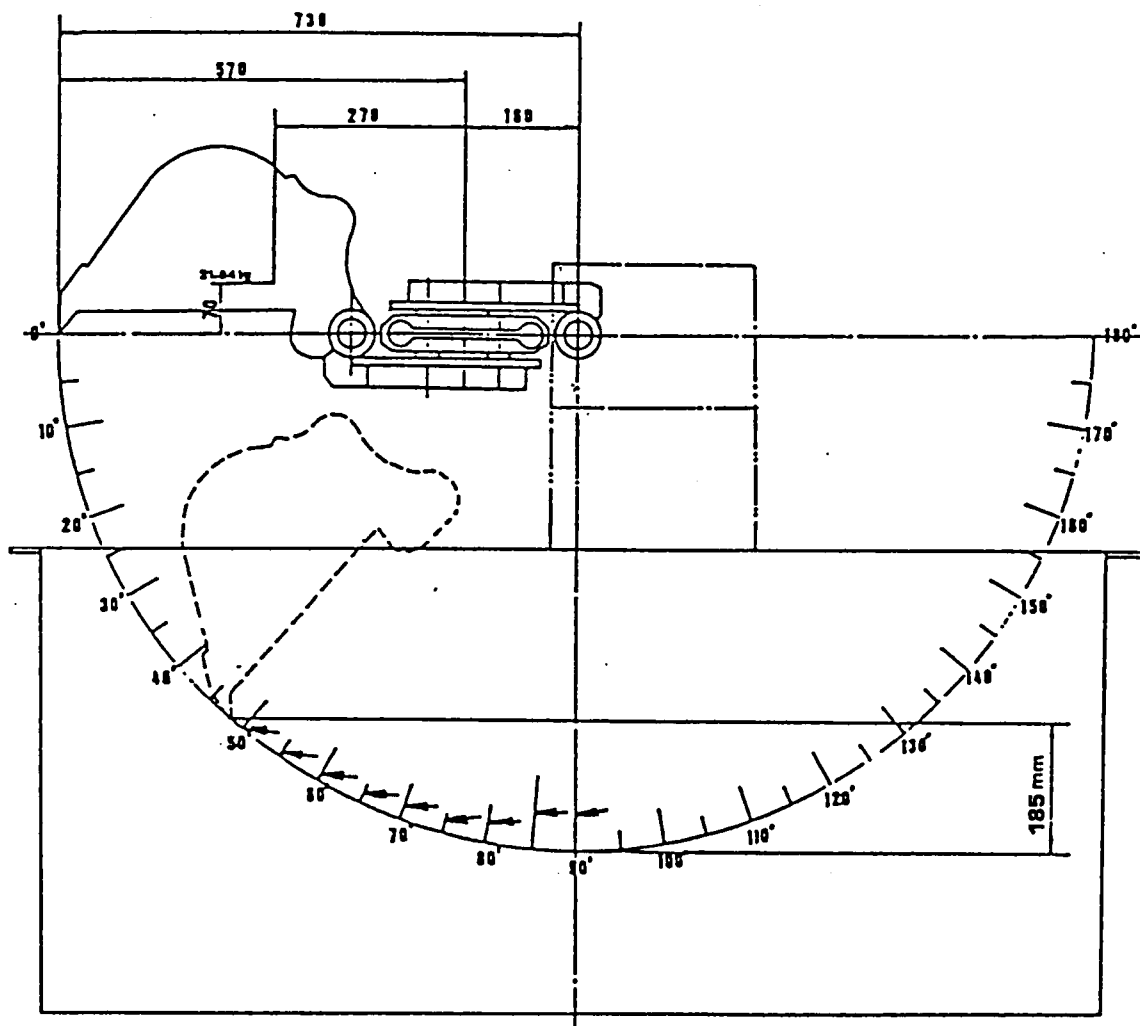


図 5 - 1 7 バケットの姿勢毎に掘削抵抗の合力の方向と着力点の位置

5-5 土と鋼板との摩擦実験

5-5-1 実験の目的

前節（5-3）で述べたように土の掘削中いろいろな抵抗がバケットにかかる。実際問題としてこれらの抵抗，特に摩擦抵抗については非常に測定が困難である。故に，仮定として全部の抵抗を合抵抗として表わすことにした。

一方，油圧ショベルの能力を向上させるために，掘削抵抗を正確に把握するとともに，掘削抵抗を減らすことが重要である。摩擦抵抗は土の内部摩擦抵抗と土と金属との摩擦抵抗である。故に，摩擦抵抗に大きな影響力をもつ要素は土の性質のほかに，鋼板材料の性質，表面粗さ，表面硬さなどである。今回の実験で砂について種々の鋼板表面粗さとの摩擦関係などを明らかにするのが本実験の目的である。

5-5-2 実験方法

実験に使用した試料は標準砂であり，その含水比は2.50%，6.06%および7.41%の3種類である。鋼板試料には掘削実験用バケットモデルの材料と同じ，構造用鋼材 S S 41を用い，表面粗さは 4μ ， 10μ および 16μ 程度の3種類である。実験方法を図5-18に示す。実験装置は一面せん断試験機のものを用いた。実験は不飽和状態において非圧密非排水条件で等体積試験を行った。上載圧は4段階（0.4，1.2，2.0，3.2 kgf/cm²）であり，以上の条件によって砂と砂，砂と鋼板との摩擦実験を行った。

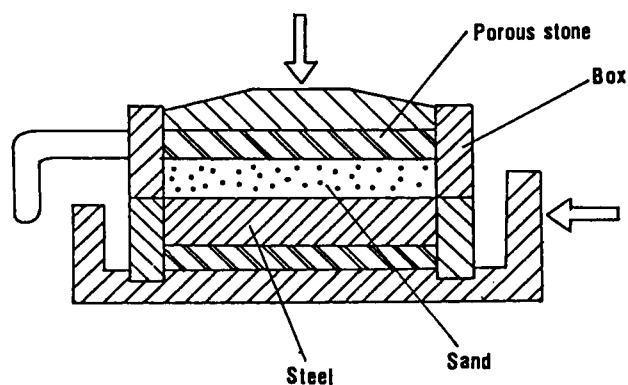


図5-18 土と鋼板との摩擦の実験装置

5-5-3 実験結果および検討

砂のせん断破壊は土粒子自体の破壊ではなく、土粒子の接触点の相対的移動であると考えられている。つまり、砂のせん断抵抗は摩擦抵抗であり、そのせん断特性は常にせん断抵抗角 ϕ によって規定されると一般に考えられている。一面せん断実験結果から求めた直圧力 p と摩擦応力 f との関係を図5-19に示す。砂と鋼板との間の摩擦では直圧力 p と摩擦応力 f の間には $f = p \tan \delta$ ($\tan \delta$ は砂質土の種類、含水比および鋼板の種類、粗さ、硬さなどによって定まる定数)の関係がある。故に、表5-3のような式になっている。一方、実験中に砂の各含水比状態と鋼板の各粗さ状態に対して $f = p \tan \delta$ 関係式中の関数値は表5-4に示す。

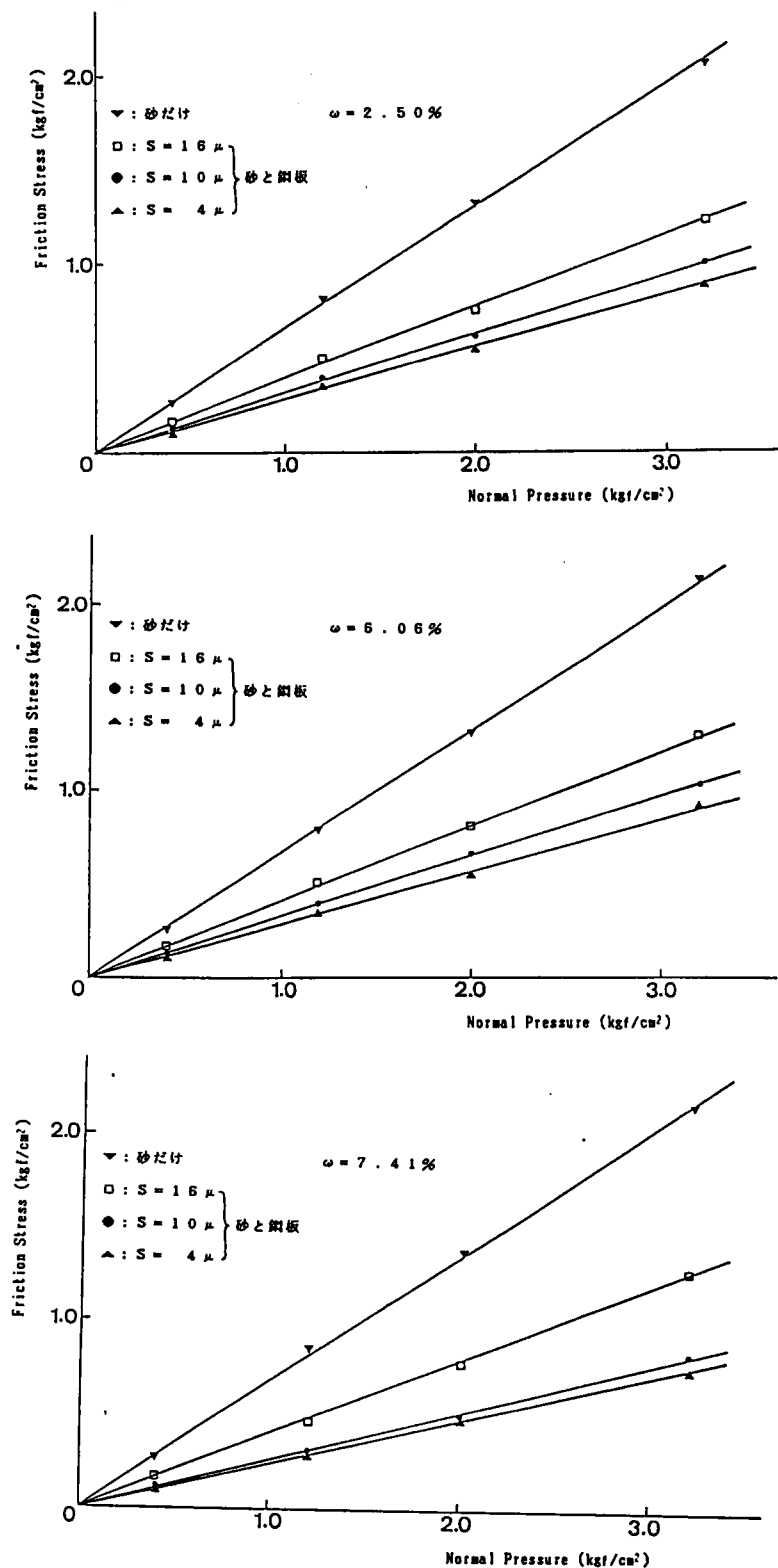


図5-19 砂と鋼板との摩擦の実験結果

表 5 - 3

土の種類	土と鋼板との摩擦条件	せん断破壊条件
砂	$f = p \tan \delta$	$\tau = \sigma \tan \phi$

表 5 - 4

含水比(%)	2.50			6.06			7.41		
鋼板粗さ(μ)	16	10	4	16	10	4	16	10	4
$\tan \delta$	0.38	0.32	0.28	0.41	0.33	0.28	0.41	0.26	0.24
$\tan \phi$	0.65			0.66			0.69		
$\tan \delta / \tan \phi$	0.59	0.49	0.43	0.62	0.50	0.42	0.59	0.38	0.35

試験結果によると，砂の場合には $\tan \delta$ と $\tan \phi$ との大きさが異なるのは，砂の内部ですべるときと鋼板との間ですべるときの摩擦機構の差によるものと思われる。

5 - 6 掘削抵抗の解析

土を掘削する機械と土との力学はかなり新しい学問分野である。種々の土についての掘削性能を理論的，解析的に予測する方法が現在強く求められている。特に，掘削機構をもった建設機械や農業機械の設計にあたり，掘削抵抗の計算は掘削性能上からも施工上からも大切なことである。しかし，従来この研究は未解明分野が多かった。

現在，掘削抵抗を算定する方法は二つに大別できる。一つは土圧論的計算方法で他は実験的方法である，土圧論的計算方法は建設機械のうちの掘削機械に対して実際の掘削状態にあわなかったのが適用性ないのことが判明した。故に，今では掘削抵抗を算定する方法は実験的方法しかないのが現状である。

本研究では砂質土の掘削実験結果の解析には畠の掘削機構に関する理論によりバケットの土の掘削抵抗の実験によって得られた切線抵抗 F_t および法線抵抗 F_n の結果

と理論解析との比較検討を行う。砂の掘削理論に用いる記号は次のとおりである（図5-20）。 θ ：バケット瞬間回転角（計測中心線と水平面とのなす角）（度）， Q_B ：バケットなどの重さ（kgf）， Q_s ：バケットに入った砂の重さ（kgf）， H_α ：掘削抵抗の水平成分（kgf）， V_α ：掘削抵抗の鉛直成分（kgf）， F_t ：掘削抵抗の切線分力（kgf）， F_n ：掘削抵抗の法線分力（kgf）， $Bbt \frac{dt}{dx}$ ：貫入抵抗（kgf）， $Bbt \frac{dt}{dx} \tan \delta$ ：貫入抵抗により生じた摩擦抵抗（kgf）， B ：掘削幅（cm）， t ：掘削深さ（cm）， R_s ：比掘削抵抗（kgf/cm³）， b ：貫入抵抗係数（kgf/cm²）， δ ：砂と刃先との摩擦角（deg）， dt/dx ：刃先の軌

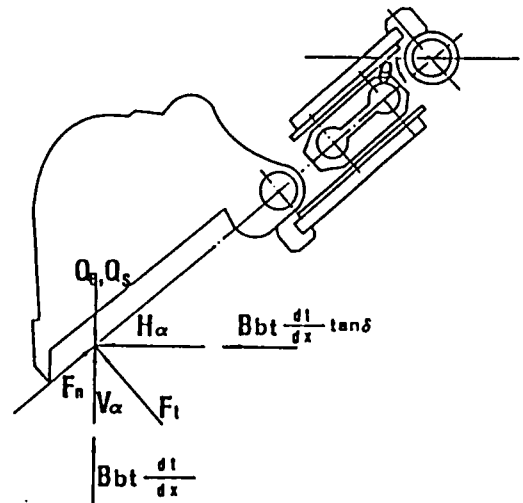


図5-20 バケットにかかる抵抗

跡の接線方向係数。これらの幾何学的関係から次の式で表わされる。

$$F_t = (H_\alpha + Bbt \frac{dt}{dx} \tan \delta) / \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) + (-Q_B - Q_s + V_\alpha + Bbt \frac{dt}{dx}) / \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) \quad (5-1)$$

$$F_n = (-Q_B - Q_s + V_\alpha + Bbt \frac{dt}{dx}) / \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) - (H_\alpha + Bbt \frac{dt}{dx} \tan \delta) / \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) \quad (5-2)$$

そのうち H_α および V_α の計算は畠の式による¹⁾。すなわち：

$$H_\alpha = 1.8 R_s B t^2 10^{-0.45\alpha} \quad \alpha : \text{ラジアン}$$

$$V_\alpha = H_\alpha \tan(\delta - \alpha)$$

として求められる。

掘削深さは次の式により計算される。

$$t = R \left[\cos\left(\frac{\Phi}{2} - \theta'\right) - \cos \frac{\Phi}{2} \right]$$

ただし: R : 掘削半径 (cm) , ϕ : 土を掘削するときのバケットの全回転角 (度)
 θ' : 土を掘削するときのバケットのバケット瞬間回転角 (度) である。

実験によって得られた値と式 (5-1) , (5-2) によって計算値との比較検討を行う。

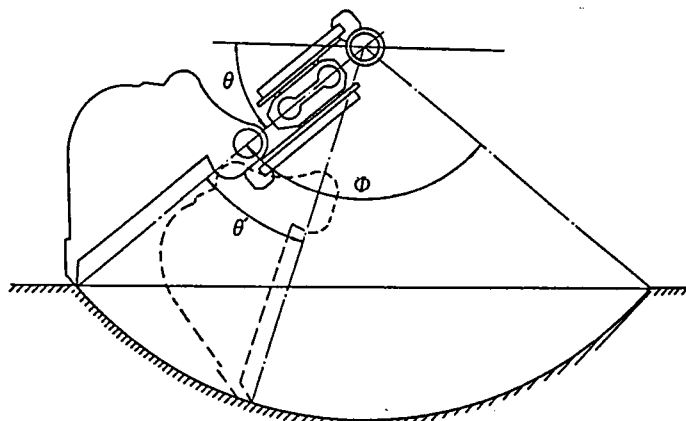


図 5-2 1 バケット回転角

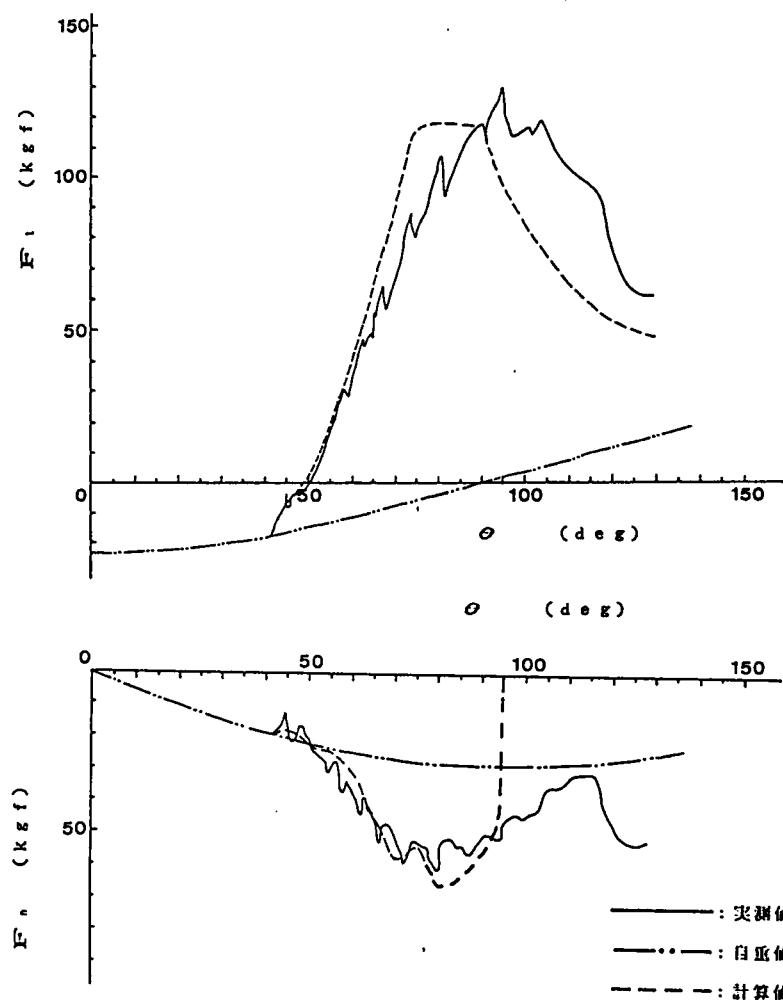


図 5-2 2 切線抵抗および法線抵抗の計算値と実験値の比較

図 5-22 はバケットの土の掘削するとき，バケットにかかる切線抵抗および法線抵抗の計算値と実験値の比較した一例である。この砂の掘削抵抗の具体的な数値を求めるため，各値は次のとおりである。比掘削抵抗 $R_s = 0.0141 \text{ kgf/cm}^3$ （土槽内で実測），係数 $m = 0.45$ （畠の実験による），密度 $\rho_t = 1.4671 \text{ g/cm}^3$ （土槽内で実測値），砂と刃先との摩擦角 $\delta = 15.6^\circ$ （一面せん断実験による），掘削幅 $B = 30 \text{ cm}$ ，貫入抵抗係数 b は図 5-23¹⁾ から求められる，具体的な数値は表 5-5 に示す。以上の数値による計算結果は表 5-6 に示す。

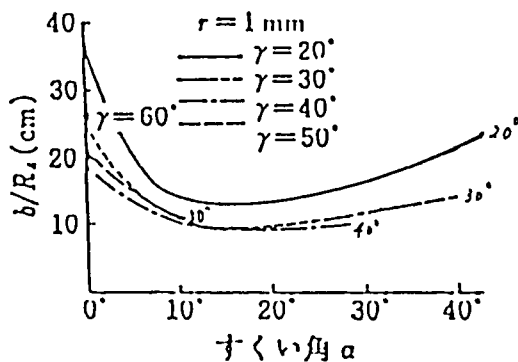


図 5-23 貫入抵抗係数 b

θ (deg)	α (deg)	b (kgf/cm ²)
50	12.5	0.141
55	18.5	0.120
60	23.5	0.120
65	28.5	0.141
70	33.5	0.169
75	38.5	0.310
80	43.5	0.353
85	48.5	0.381
90	53.5	0.409
95	58.5	0.000

表 5-5 貫入抵抗係数 b 値

砂の掘削理論の検討を行うため，計算値と実測値との比較を行った。その結果は図 5-22 に示す。図 5-22 から次のことが分かる。

1) F_t について

①実験から得られた曲線と計算式から求めた理論曲線は傾向的に比較的よく一致している。そのうち，バケット回転角 90° までの範囲で理論値と実測値の大きさほぼ一致する。しかし，バケット回転角 90° 以後では曲線傾向は一致するが，絶対値は異っている。この原因は理論計算が爪の形状をいずれも平刃として考え，運土抵抗を

表5-6 切線抵抗 F_t および法線抵抗 F_n の計算値と実測値の比較表

θ (deg)	α (deg)	t (cm)	F_t (kgf)	F_n (kgf)	F_t (kgf)	F_n (kgf)
			計算値		実測値	
50	13.5	2.50	25.48	19.96	12.90	-21.84
55	18.5	6.30	18.08	-20.30	31.22	-27.64
60	23.5	9.70	42.03	-33.10	44.44	-34.34
65	28.5	12.59	66.54	-45.66	62.95	-41.34
70	33.5	15.00	87.47	-57.83	71.42	-46.34
75	38.5	16.89	111.53	-53.95	90.46	-50.34
80	43.5	18.25	116.96	-67.83	109.93	-54.84
85	48.5	19.07	115.66	-73.06	114.90	-46.74
90	53.5	19.34	110.54	-63.13	120.61	-43.44
95	58.5	19.07	96.78	0.00	129.08	-40.44
100	63.5	18.25	83.16		113.52	-38.44
105	68.5	16.89	72.01		108.97	-28.94
110	73.5	15.00	64.67		99.87	-26.44
115	78.5	12.59				

(表に負は抵抗の方向が下に向きである)

を考慮していない為であろう。

②最大掘削抵抗の計算値はバケット回転角 90° に達したとき、すなわち、最大掘削深さに達したとき掘削抵抗が一番大きい。しかし、実測値では最大掘削抵抗値はバケット回転角 90° 後(約 $95^\circ \sim 100^\circ$)の範囲内にある。この原因としては種々のものが考えられるが、まず、次のように考えている。バケット回転角 90° ときの掘削深さ(19.34cm)とバケット回転角 95° ときの掘削深さ(19.07cm)の変化はあまり大きくないが、 95° ときバケット内の土量は 90° ときの土量より大きい。そのとき土の掘削のほか、同時にバケット前に未掘削土を押して移動する為、そのときの掘削抵抗値は大きい(この傾向はその他の実験例も大体同じ)。しかし、バケット回転角 95° 後、掘削深さが減少するほか、バケット回転角が 90° に達する前に土のすべり破壊領域が大となり、 90° 以後土の内部組織が破壊されたため、掘削抵

抗値も小くなる。

2) F_n について

F_n の理論値曲線と実測値曲線の傾向と絶対値は大体一致している。

5-7 バケット寸法の選択

バケット容量 q (すなわち、掘削された土砂の体積)、バケット幅 B 、掘削半径 R および土を掘削する時バケットに土が一杯になるバケット回転角 Φ はバケットの主なパラメータである。そのうち、 R 、 B および q との関係が次の式で表わされる (図 5-24 参照)。

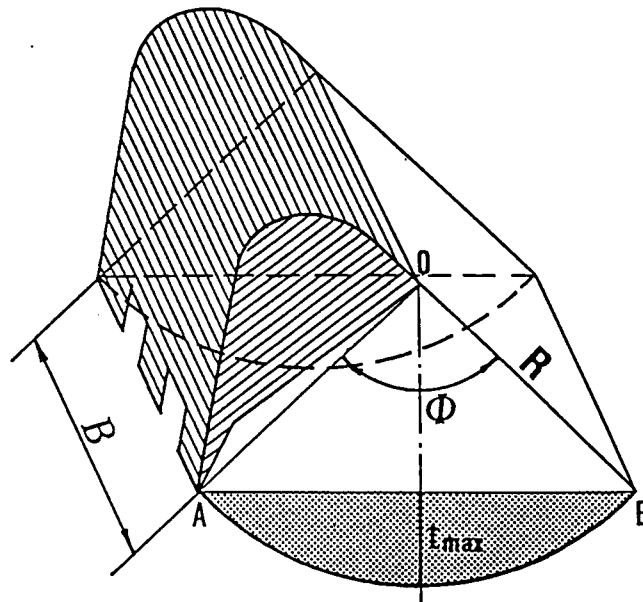


図 5-24 バケット主なパラメータ略図

$$q = \frac{1}{2} R^2 B (\Phi - \sin \Phi) \quad (5-3)$$

以上の式によると、バケット容量 q が決まると、 R 、 B および Φ のうち任意の 2 つパラメータを決めれば、ほかのパラメータ値が決まる。

バケットで土を掘削する時掘削仕事が次の式によって表わされる。なお、法線抵抗 F_n と着力点の影響は省略する。

$$A = \int_0^{\Phi} F_t R d\theta \quad (5-4)$$

ここに：A　：掘削仕事 (kgf・m)

F_t 　：切線抵抗 (kgf) (式 (5-1) によって計算する)

R　　：掘削半径 (m)

Φ 　　：土を掘削する時のバケット全回転角 (deg)

$d\theta$ 　：土を掘削する時のバケット微小回転角。

掘削土量 1 m^3 当りの消費仕事量が次式のようになる。

$$E = \frac{A}{q} \quad (\text{kgf} \cdot \text{m} / \text{m}^3) \quad (5-5)$$

以上式の (5-3) , (5-4) , (5-5) から、バケット容量 q を一定にすると、R , B , Φ は一定値ではなく、変化するものである。従って、バケット容量 q が決ると、最小の E によって、バケットパラメータを決めるわけである。

土の掘削実験の結果により、掘削幅 B , 掘削半径 R および土を掘削する時のバケット全回転角などバケットの主なパラメータを、掘削仕事および掘削土量 1 m^3 当りの消費仕事量によって検討した。その結果は付表 1 に示す。計算結果から F_t と B と Φ と R との関係が図 5-25 のようになる。E と B と R との関係を図 5-26 に示す。これらの関係を用いて検討すると。

(1) バケット容量 q が決ると、 F_t と E が B , R の増加とともに減少するが、その減少傾向は曲線のようなものである。しかし、B と R の増加がある値になると、 F_t と E は緩慢に減少する。一方、B が増加すれば、 F_t と E が減少するが、アタッチメント構造物に対してモーメントが増加する。故に、アタッチメント構造物の荷重も増加する。各部材の安全のため、構造物の重量も増す。もし、R が増加すれば、 F_t と E も減少するが、バケット幅 B も小さくなる。掘削完了、バケット排土が不便である。また、E も増加する。

(2) Φ が小さいと、 F_t も減少するが、B あるいは R が増加する。逆に、 Φ が大き

くなると、 F_t も増加する。

以上の検討により、 Φ が $85^\circ \sim 110^\circ$ 間および R と B との値の差が少ない方がよいと考えられる。

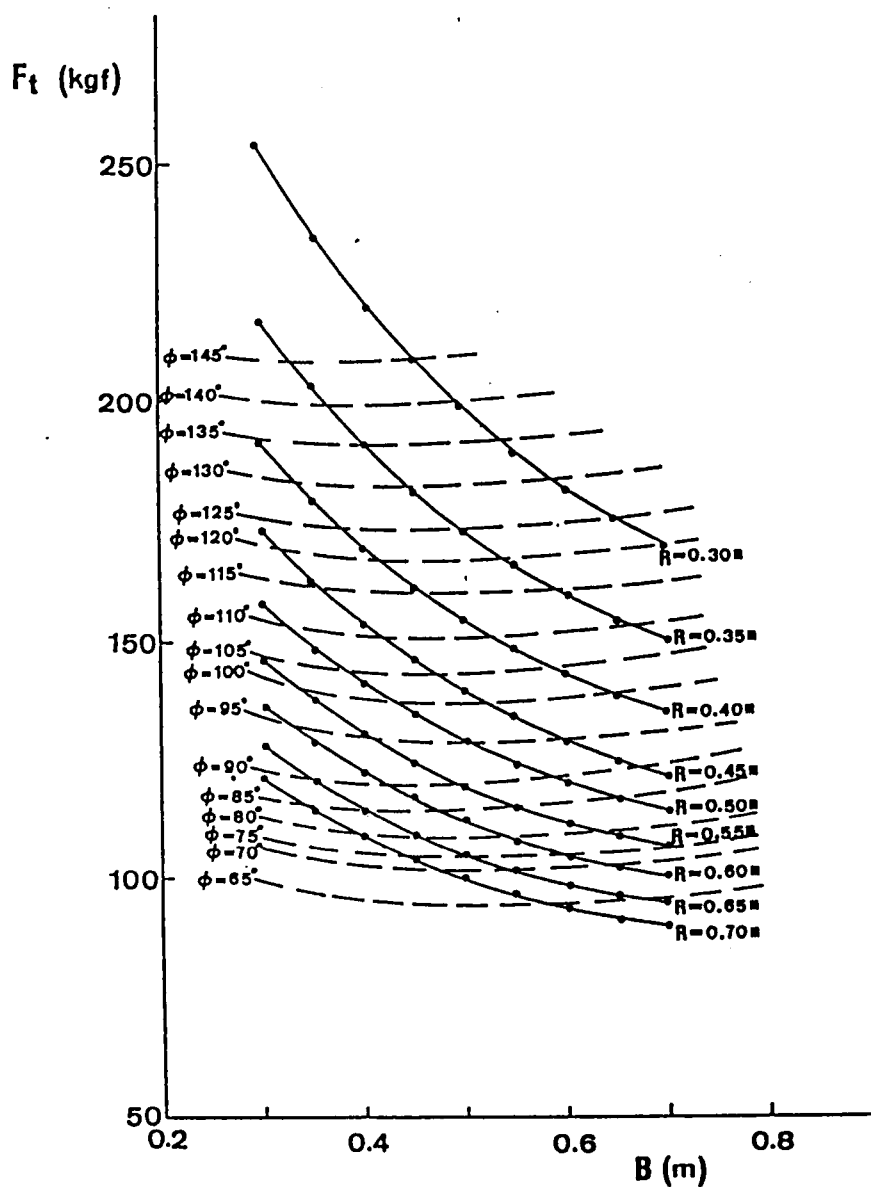


図 5-25 $q = 0.018 \text{ m}^3$ の F_t と Φ , B , R との関係

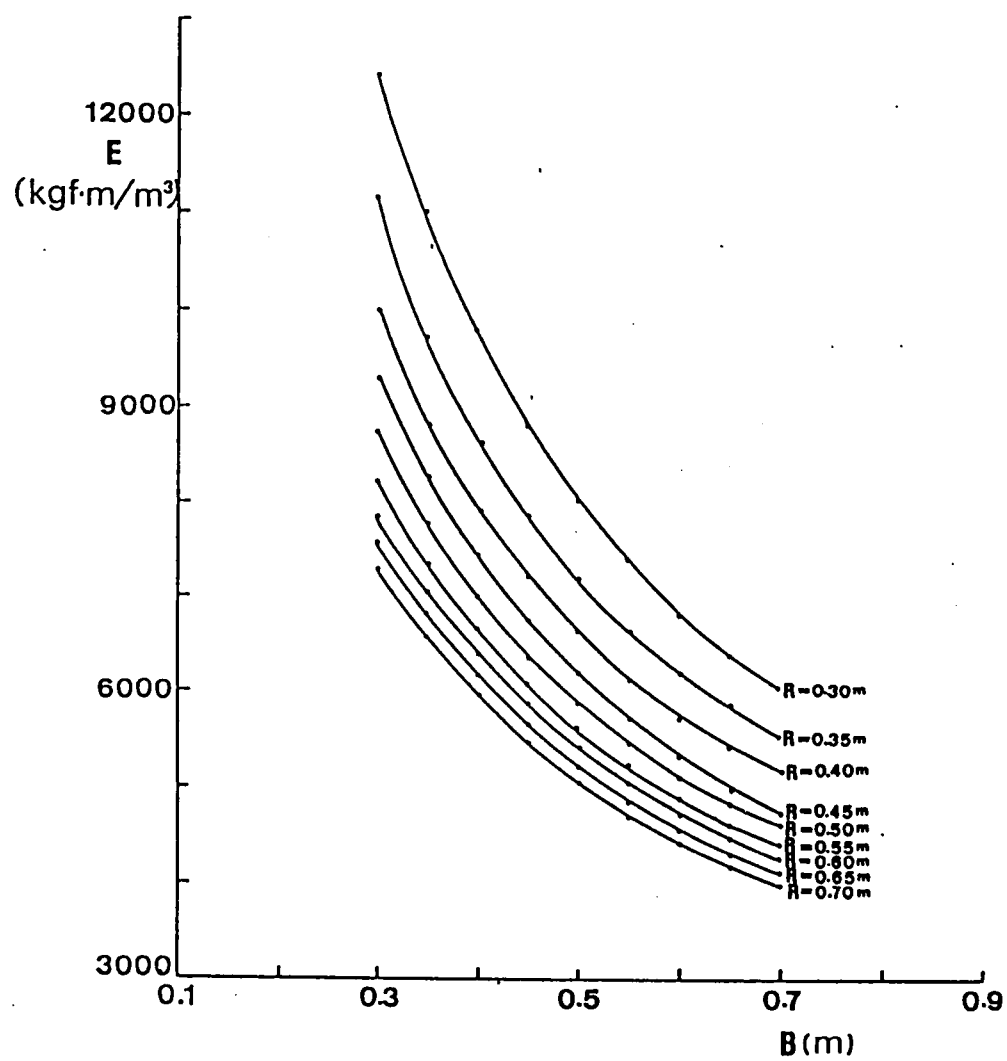


図 5 - 2 6 $q = 0.018\text{m}^3$ の E と B , R との関係

5-8 実際の油圧ショベルとの対応

「油圧ショベルの掘削能力」は油圧ショベルを設計製作するにあたり，その機械の性能を決定する最大のテーマである。すなわち，機械の大きさ，重量，エンジン出力および車体の安定性などから見て適正な掘削力，あるいは掘削能力とはいかにあるべきか，また，掘削可否の限界をどのように見極めればよいのかという問題は油圧ショベル開発当初（約1951年頃）からの課題であったが，「土」そのものを取扱うことから困難な要素が多く，その解明はまだ行われておらず「油圧ショベルのバケット掘削」に関する問題は経験と勘に頼って処理しているのが現状であると言っても過言でない。

本研究では油圧ショベルのバケット掘削機構を土質力学的観点からとりあげ種々の掘削条件による砂質土の掘削実験を行った。バケット掘削機構を「切線抵抗」と「法線抵抗」に単純化し，「切線抵抗」は油圧ショベルの掘削能力を決めるパラメータとなり，「法線抵抗」は油圧ショベルのアタッチメントの構造物強度を計算する一つのパラメータとなる。本実験結果により，砂質土について掘削によってバケットにかかる掘削抵抗の大きさ，方向および着力点位置などを解明した。また，畠の掘削機構に関する理論をバケット掘削に適用して考察を行った。更に，計算値と実測値を比較することが行われた。最後に，バケット容量が決まっているとき，掘削仕事および掘削土量 1 m^3 当りの消費仕事量によってバケット最適形状を決めるわけである。しかし，本実験の結果をそのまま用いて実際の油圧ショベルのバケットの掘削抵抗を計算できるが，実際には砂質土を掘削する場合は少ない。もしあれば，本研究の結果の応用である程度推定することができる。そのとき掘削抵抗解析手順は図5-27によって処理する。

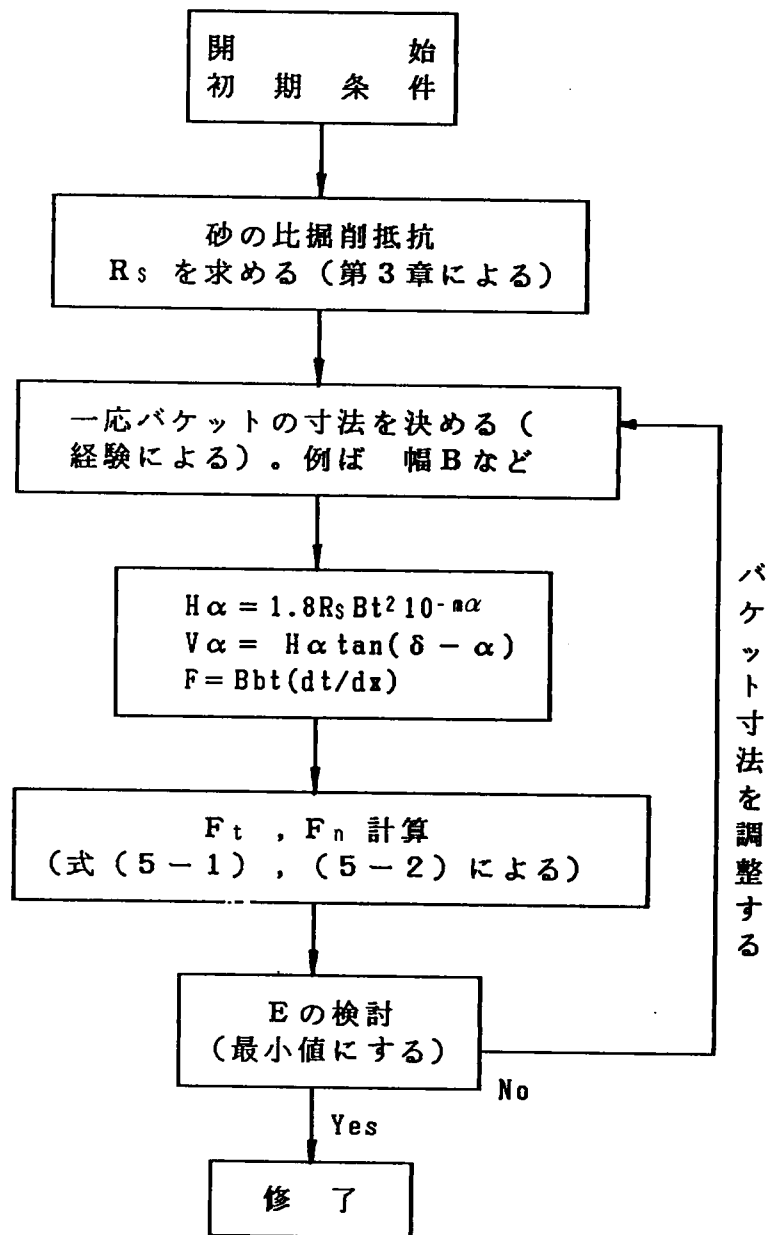


図 5-27

5-9 結論

油圧ショベルの掘削機構を知るために、砂質土の掘削実験を行った。砂の比掘削抵抗 R_s を測定すれば、畠の掘削理論および本研究の結果から、掘削抵抗を論じることができる。

基礎実験およびバケット掘削実験から次のような結論を得た。

(1) 掘削抵抗 F_t , F_n の大きさについて砂質土の場合には切線抵抗 F_t , 法線抵抗 F_n とも大きさは掘削条件などに関係するが、一般的には次のようになっている。すなわち、 F_t と F_n は掘削深さ t の増大とともに増加するが、その増加傾向は F_t では掘削深さ t の 2 乗に比例する。 F_n ではその傾向は認められなかった。掘削抵抗 F_t および F_n は掘削速度 V が変化しても変らない。さらに、掘削抵抗は爪の形との関係がないこともわかった。砂質土ではバケットにつける爪数が変化しても掘削抵抗にあまり影響がないことが認められた。一方、バケットの爪の有無の場合には掘削抵抗が異なる、爪なしときの切線抵抗 F_t は爪のあるときの切線抵抗 F_t より大きい。その比は約 1.37 倍ぐらいである。全体から見ると、法線抵抗 F_n は切線抵抗 F_t より小さい。

(2) 掘削抵抗 F_t および F_n の方向について：バケットによる砂の掘削場合には切線抵抗 F_t の方向は掘削過程に変わらない、すなわち、バケットに向かう。この抵抗は油圧ショベルを設計するにあたって重要なパラメーターである。一方、法線抵抗 F_n の方向は掘削条件によって変化している。また、掘削抵抗合力の作用方向の変化はバケット回転角によって異なるが、一般的にその方向は反時計回りとなることも判明した。

(3) 掘削抵抗着力点の位置について：着力点の位置（バケット刃先から着力点までの距離 L ）と掘削条件との関係は次のようになっている。すなわち、砂質土の場合には掘削条件にかかわらず、バケット回転角によってだんだん爪先から上方へ変化しているが、着力点が変化してもほぼ刃先の付近あるいは刃先から少し離れている。

(4) 砂質土の掘削抵抗を解析すると、掘削の実験値は理論による計算値とよく一致している。故に、畠の掘削機構理論がバケットの砂の掘削抵抗を計算する方法として妥当であることが分かった。

(5) バケット容量が決まっているとき、掘削仕事および掘削土量 1 m^3 当りの消費仕事量によってバケット最適形状が決められる。

以上をまとめて図 5-28 に示す。


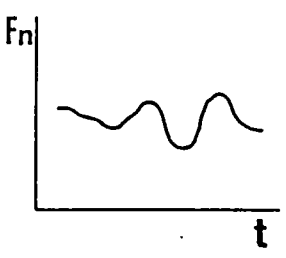
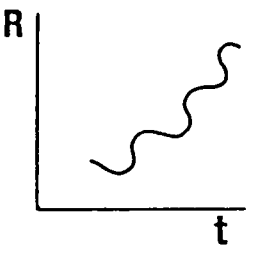
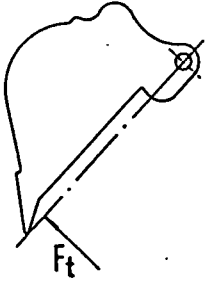
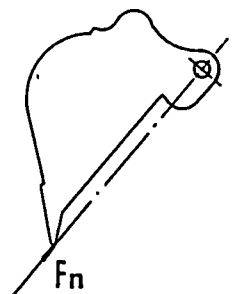
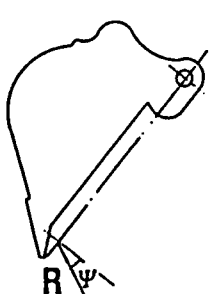
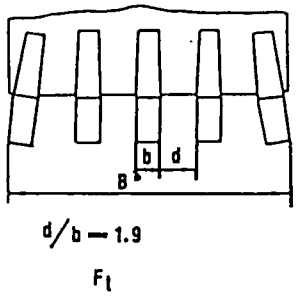
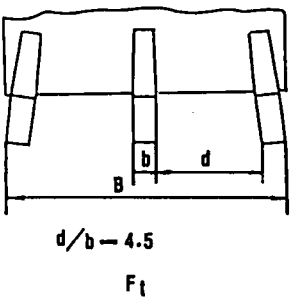
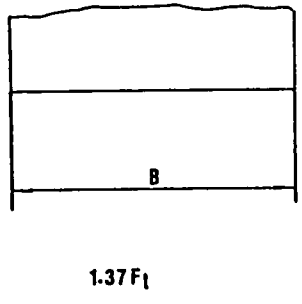
	F_t	F_n	R
大 き さ			
方 向 お よ び 着 力 点			
爪 の 条 件			
F_t	 <p>$d/b = 1.9$ F_t</p>	 <p>$d/b = 4.5$ F_t</p>	 <p>$1.37F_t$</p>

図 5 - 2 8

参 考 文 献

- 1) 畠 昭治郎著：建設機械学，鹿島出版会，PP151～158，1987年

第6章 粘性土の掘削抵抗に関する実験結果，考察および解析

6-1 概説

前章ではバケットを用いた砂質土の掘削実験により，掘削抵抗などについて解明した。更に，畠の掘削機構理論により計算した理論値を実験の結果と比較し，検討を行って畠の掘削理論が妥当なものであることがわかった。

粘性土を掘削する場合，粘着力があるため，砂質土の掘削と異なるが，実際の掘削においては粘性土の掘削にはよく遭遇することである。しかし，粘性土に対する油圧ショベル掘削機構についてはまだ解明されていない現状である。故に，粘性土の掘削機構に関する諸問題を解明し，掘削機構を究明することが，油圧ショベルの性能を向上させ，その掘削特性を把握するために，早急に解決すべき重要な課題である。

本章においては粘性土の掘削機構を解明，把握するために実験的考察を行った。その結果と解析について論述する。

6-2 実験方法

6-2-1 実験内容

土槽内での粘性土のバケット掘削実験で，次のことを行った。

- (1) 粘性土の変形：掘削中の粘性土のうごき（パターン）。
- (2) バケットにかかる力：掘削抵抗の大きさ，方向，着力点。

実験の全体を通じて，掘削半径が 730 mm のとき，掘削速度は 0.055 m/sec で一定とし，変化させたパラメーターは次のとおりである。

- (a) バケットの刃先には5本の爪が取付けてあり，その方法は図6-1 a，bに示したとおりである。
- (b) バケットの爪先間隔の変化および本数の影響。すなわち5本と3本。
- (c) 爪の取付け方は図6-1 a，bに示す。
- (d) 爪の有無。
- (e) 掘削深さを変化させる。

なお，具体的な実験条件を表6-1に示している。

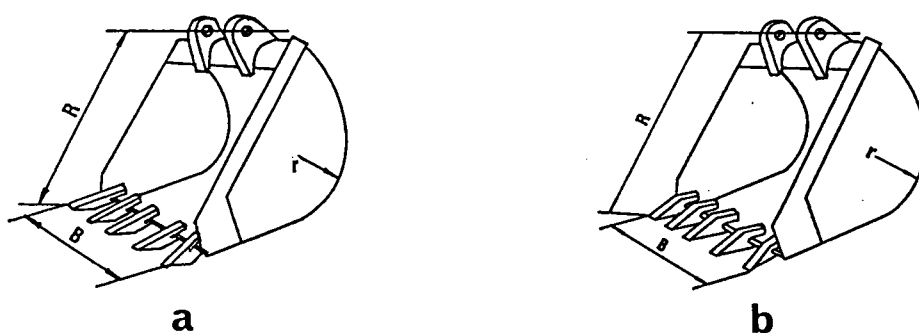


図 6-1 バケットと実験用爪の取付方法

表 6-1 掘削条件

掘削幅 B (mm)	掘削速度 V (m/sec)	掘削半径 R (mm)	最 大 掘削深さ t (mm)	爪					知ろうとする項目
				5本	なし	3本	図6-1a	図6-1b	
300	0.055	730	100	*			*		掘削深さの影響
300	0.055	730	150	*			*		
300	0.055	730	180	*			*		
300	0.055	750	150	*			*	*	爪取付方法の影響
300	0.055	730	150	*		*			爪数の影響
300	0.055	730	150	*		*			
300	0.055	730	150	*					爪有無の影響
300	0.055	730	150	*	*				

6-2-2 実験用試料

実験に使用した試料は深草粘土である。その粒径加積曲線を図 6-2 に、土質力学的な性質を表 6-2 に示す。

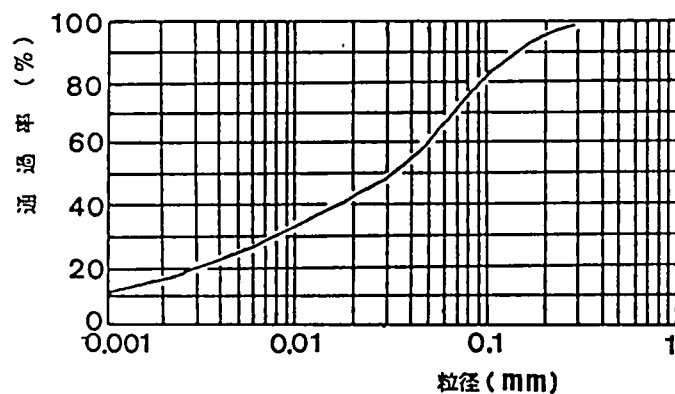


図 6-2 深草粘土の粒径加積曲線

6-2-3 掘削装置（バケット）の寸法

粘性土の掘削実験に使用したバケットは砂の掘削実験に使用したバケットと同じものである。

6-2-4 実験方法

掘削実験前に実験用粘性土を一定の厚さ（一回ごと約 50 mm）土槽中にまき出し，振動機で締固める。掘削実験直前に特製のブレードにより表土部分を削り取って，土槽中の粘性土が所定の掘削深さになるようにする。掘削実験装置（バケットなど）を土槽両側に固定してから，その後，次の手続をする。

（1）土槽中の前の左，右と土槽の後の左，右，あわせて4か所の粘性土を取って，含水比と密度を測る。

（2）土槽の掘削実験前方で比掘削抵抗 R_s を測定する。

（3）バケットを水平状態に調整する。

（4）各計測器を入力状態にする。

（5）掘削実験開始，同時にバケットにかかる抵抗力は掘削抵抗測定用三成分力計により，三成分力計に対して長軸方向及び短軸方向の二抵抗分力および中心の回りの抵抗モーメントをカセットデータレコーダに記録させる。

（6）掘削実験終了後，土槽中の粘性土を全部外に出す。それに，バケットに附着した土を取り除く。

（7）外に出した粘性土の含水比を一定に保つためビニールシートなどでできるだけ密封しておく。

表6-2 実験に使用した粘性土の性質

比 重		2.687
粒 度 分 布	均等係数	62.5
	曲率係数	1.6
含 水 比 (%)		30.13 ~ 30.89
乾燥密度 (g/cm ³)		0.9709~1.0868
内部摩擦角(deg) (一面せん断による)		8.87
比掘削抵抗 (kgf/cm ³)		0.0162~0.0180

6-3 実験結果および考察

粘性土の掘削抵抗を支配する要素を正確に把握するために、種々の要素を変えて粘性土の掘削実験を行った。その実験結果を整理して検討する。なお、整理過程に下記に示す諸記号を用いる（図6-3参照）。

F_t : 掘削抵抗切線分力 (kgf)

F_n : 掘削抵抗法線分力 (kgf)

H_α : 掘削抵抗水平分力 (kgf)

V_α : 掘削抵抗垂直分力 (kgf)

R : 掘削抵抗合力 (kgf)

θ : バケットの回転角 (deg)

α : すくい角 (deg)

ψ : 掘削角 (deg)

B : バケット幅 (cm)

t : 掘削深さ (cm)

x : 掘削行程, 掘削水平距離 (cm)

R_s : 土の比掘削抵抗 (kgf/cm³)

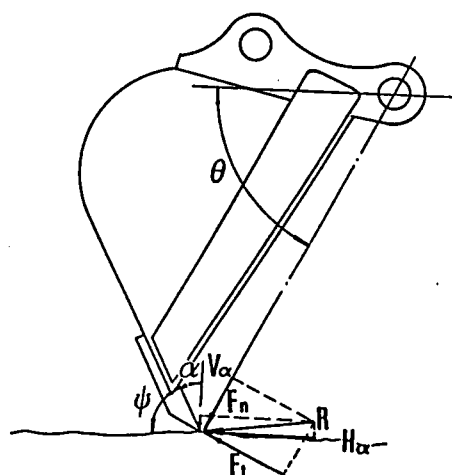


図6-3 働く力のモデル

6-3-1 掘削抵抗の切線成分 F_t と法線成分 F_n

掘削実験によってバケットにかかる掘削抵抗の切線成分 F_t とバケット回転角 θ (あるいは掘削深さ t) との関係を図6-4, 法線成分 F_n とバケット回転角 θ (あるいは掘削深さ t) との関係を図6-5, 掘削抵抗モーメント M_y とバケット回転角 θ (あるいは掘削深さ t) との関係を図6-6に示す。これらは掘削実験結果の一例である。横軸はバケット回転角を, 縦軸は切線抵抗 F_t , 法線抵抗 F_n および抵抗モーメント M_y ならび掘削深さ t それぞれを表わす。実線は掘削中バケットにかかる抵抗を, 二点鎖線はカラ運転状態でのバケット自重による各分力であり, 破線は掘削深さの変化を表わすものである。掘削抵抗はバケットにかかる抵抗からカラ運転状態のバケット自重の変化を減じたものである。これらの実験結果によれば掘削深さ t の増加とともに各抵抗が増加しているが。切線抵抗 F_t の立上りが法線抵抗 F_n の立上りよ

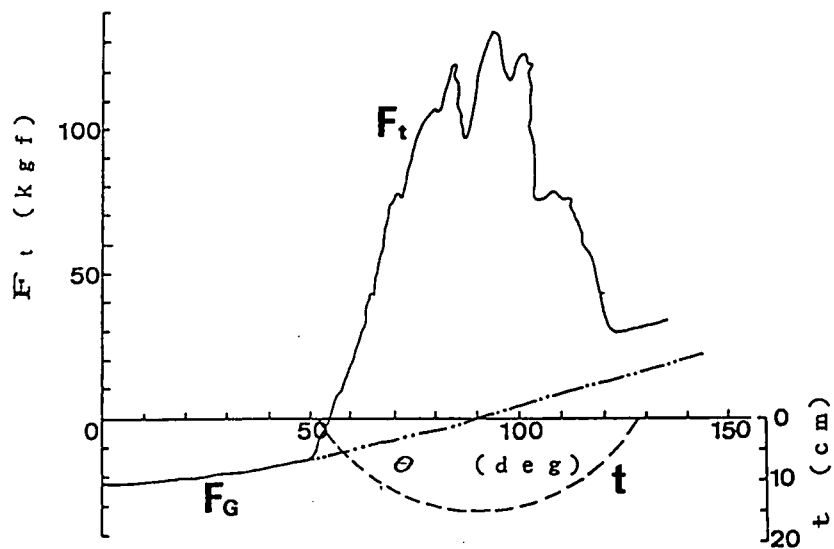


図 6-4 切線抵抗 F_t とバケット回転角 θ との関係

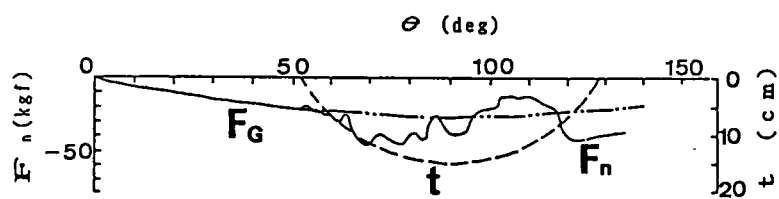


図 6-5 法線抵抗 F_n とバケット回転角 θ との関係

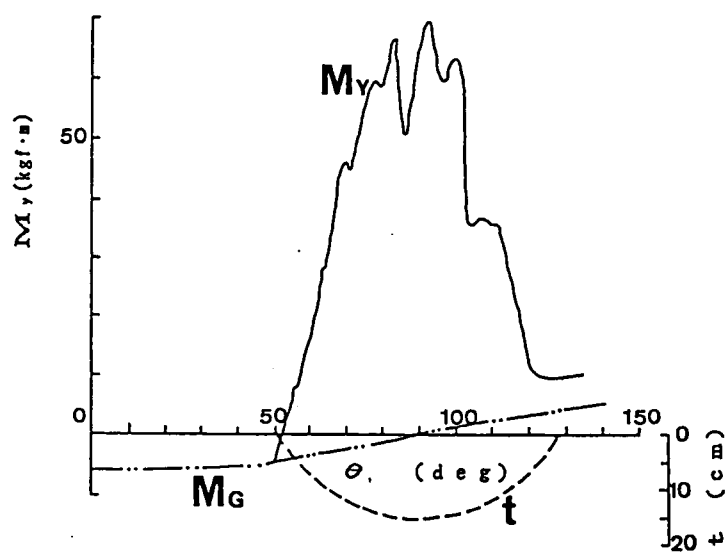


図 6-6 掘削抵抗モーメントとバケット回転角との関係

り大きい。切線抵抗 F_t はバケット回転角約 90° ぐらい（約最大掘削深さところ）前に掘削深さ t の増加するにつれて急に増加し，それにせん断破壊線が掘削に伴って発生した。バケット回転角約 90° ぐらい（最大掘削深さ）後に切線抵抗 F_t は掘削深さ t の減少とともに減少し，その減少の状況は砂質土より急に減少している。その理由は①粘性土では掘削深さの増加とともに土のすべり破壊領域が大きく，最大掘削深さ t 以後はすべりにすべり破壊されたところをもう一度掘削するから抵抗が小さいと考えられる。②粘性土ではすべり破壊された後，摩擦抵抗が砂質土より小さいため，掘削深さ t の減少とともに急に減少するであろう。

切線抵抗 F_t の方向はバケット回転角によって変わるが，法線抵抗 F_n の向きはバケット回転角により異なる。実験結果により，バケット回転角約 90° 前に，下（負）に向き，バケット回転角約 90° 以後に，上（正）に向く。

一方，切線抵抗 F_t と法線抵抗 F_n の関係について実測結果のうち4例を図6-7に示す。これらの結果によると，粘性土ではこの2つ抵抗間にある程度の関係は認められる。掘削開始段階にこの2つ抵抗の比は大きく，掘削深さ t （バケット回転角）の増加とともにその比は小さくなる。最大掘削深さ t に達する前後，その2つ抵抗比は一番小さい。掘削を続けると，最大掘削深さを越えて，掘削深さの減少とともに，その比はまた大きくなる。この2つ抵抗の比（ F_n / F_t ）はバケット回転角によって異なるが，全体から見ると，約 $0 \sim 0.35$ 範囲に変化する。

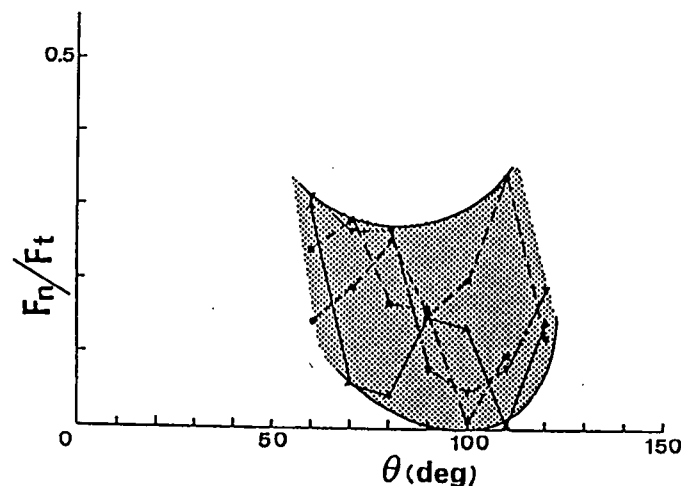


図6-7 切線抵抗 F_t と法線抵抗 F_n との関係

6-3-2 掘削抵抗と掘削深さ t の関係

この関係を調べるために、掘削深さを種々変化させた場合の関係について実験的考察を行った。この実験の目的は掘削深さ t を変えると、切線抵抗 F_t がどのような変わるかについて、定性的な傾向を見出すことである。図6-8は切線抵抗 F_t と掘削深さ t との関係に対して実測した結果を示したものである。図6-8に示されるように、掘削深さ t が増加するとともに掘削抵抗の切線抵抗 F_t も増加する。その増加傾向は粘性土ではほぼ直線的である。特に最大掘削深さ前後、この直線的傾向は顕著である。

6-3-3 掘削抵抗と爪数との関係

第5章において砂質土の場合に爪のすき間変化、爪の有無が掘削抵抗にどのような影響を与えるかが判明した。本節においては粘性土の場合では爪のすき間変化、爪の有無が掘削抵抗にどのような影響を与えるのかを明らかにするために実験を行った。

今回、実験中に掘削深さ t （最大掘削深さ約150mm）と比掘削抵抗 R_s （約0.0168 kgf/cm³）をほぼ一定に保持する。使用した爪の幅は25mmであり、5本爪をつけた場合には爪と爪とのすき間は40mmと両端の47.5mmそれぞれである。その略図は図6-9に示す。図6-10は切線抵抗 F_t と爪数との関係を示したものである。図で

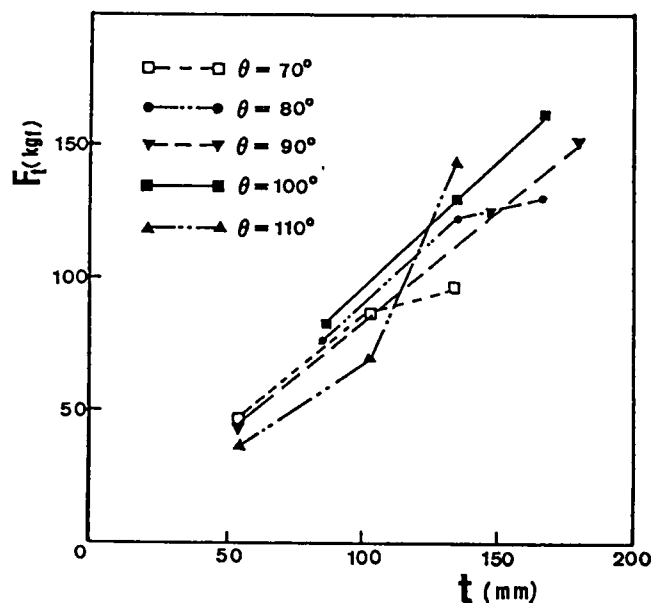


図6-8 切線抵抗 F_t と掘削深さ t との関係

実線は5本爪をつけた場合の切線抵抗 F_t の変化であり、一点鎖線は3本爪をつけた場合の切線抵抗 F_t の変化である。5本爪をつけた場合には爪のすき間と爪幅との比は1.6 と1.9 である。3本爪をつけた場合には爪のすき間と爪幅との比は4.5 倍になった。実験結果により、5本爪の場合の切線抵抗 F_t は3本爪の場合の F_t より大きい。その増加率はバケット回転角によって異なるが、最大掘削深さ前後のところには約1.28倍になる。

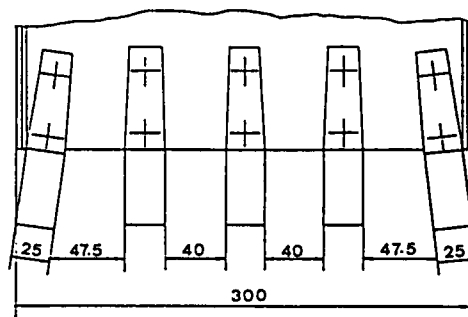


図 6 - 9 実験用爪の取付け場所

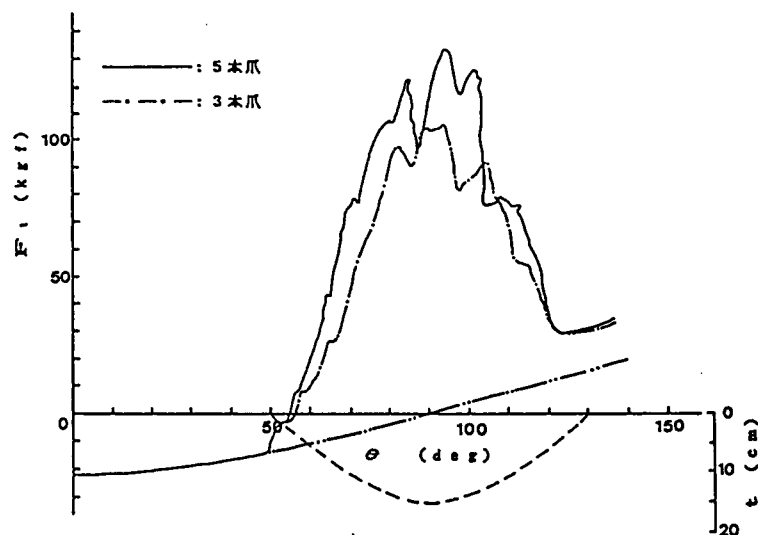


図 6 - 1 0 切線抵抗 F_t と爪数との関係

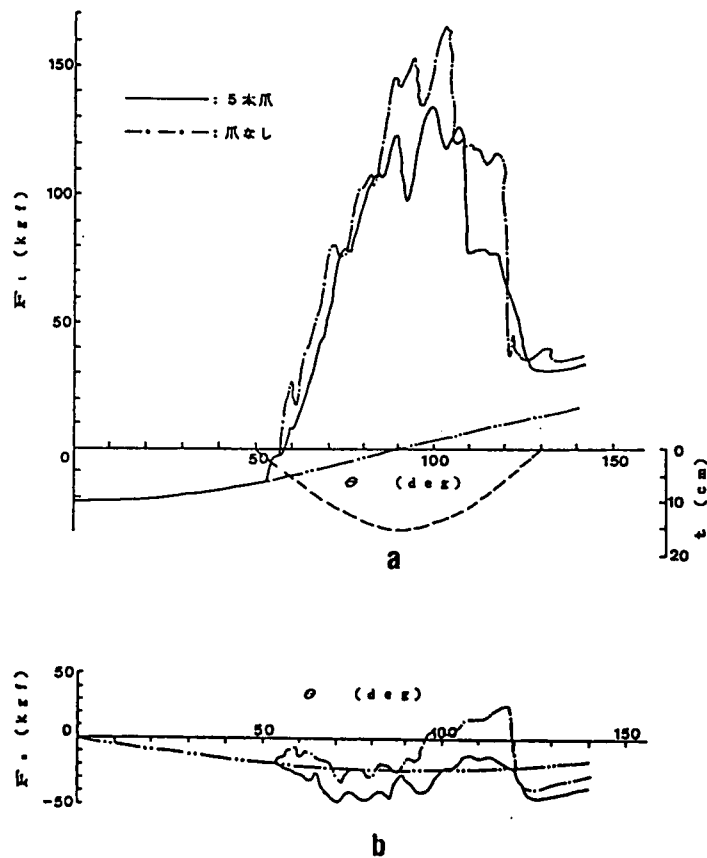


図 6-11 掘削抵抗 F_t および F_n と爪の有無との関係

一方、爪の有無の場合には掘削抵抗はどのように変わるのかことについて実験を行った。図 6-10 a, b には実線は 5 本爪をつけた場合の掘削抵抗切線成分 F_t および法線成分 F_n の変化を示したものである。一点鎖線は爪のない場合の掘削抵抗切線成分 F_t および法線成分 F_n の変化を示したものである。このうち爪のない場合と爪のある場合の切線抵抗 F_t は掘削深さ t とともに両方とも増加するが、爪のない場合の切線抵抗 F_t は爪のある場合の切線抵抗 F_t より大きい。その増加率はバケット回転角によって異なるが、最大掘削深さ前後のところには掘削抵抗切線成分 F_t の増加率は約 1.3 倍に達することが判明した。

6-3-4 掘削抵抗と爪形との関係

砂質土では爪形が変わると、すなわち、掘削角が変わるが、最大掘削抵抗は変化していないことが判明した。粘性土では掘削角が変われば、掘削抵抗が変化するかどうかについて掘削実験を行った。



図 6-12 バケットにつける爪形モデル

今回の実験では図 6-12 に示しているような (a) の爪形と (b) の爪形を使用することにした。図 6-13 に示したものは掘削抵抗切線成分 F_t と爪形との関係のものである。図 6-13 には一点鎖線は図 6-12 (a) の爪形の掘削抵抗 F_t の変化するものであり、実線は図 6-12 (b) の爪形の掘削抵抗 F_t の変化するものである。図の示したように、バケット回転角 70° ぐらい前に掘削抵抗 F_t は両方とも掘削深さとともに増加する。その増加率はよく一致する。バケット回転角 70° から

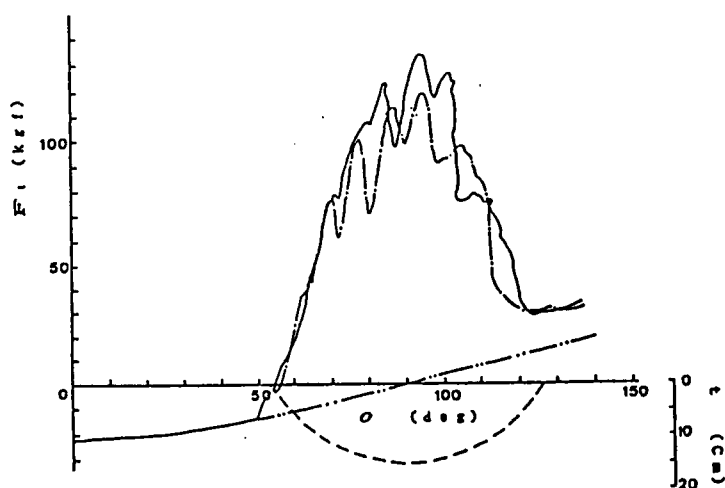


図 6-13 掘削抵抗 F_t と爪形との関係

90°(最大掘削深さ)まで、掘削抵抗 F_t は掘削深さとともに増加するが、(b)形爪のほうが(a)形爪より増加率は大きい。最大掘削深さに達するとき、その増加率は約1.12倍に達することが判明した。

6-3-5 掘削抵抗の方向および着力点

第5章で述べたように、掘削中に掘削抵抗合力の着力点の位置を正確的に把握することは油圧ショベルの設計について極めて重要である。本節においては粘性土の場合には、掘削抵抗の着力点は掘削過程中どのように変化するのかについて掘削実験を行った。図6-14に示した1例として粘性土では掘削時、バケットについて切線抵抗 F_t 、法線抵抗 F_n およびモーメントを計測し、その結果から掘削抵抗の合力とその着力点を計算して求めたものである。

ここで、掘削条件は①バケットに5本爪をつける、②爪形は図6-12の(b)に示す通りである。図により掘削抵抗の合力の方向はバケット回転角とともに変化するが、その作用方向は反時計回りとなることが判明した。

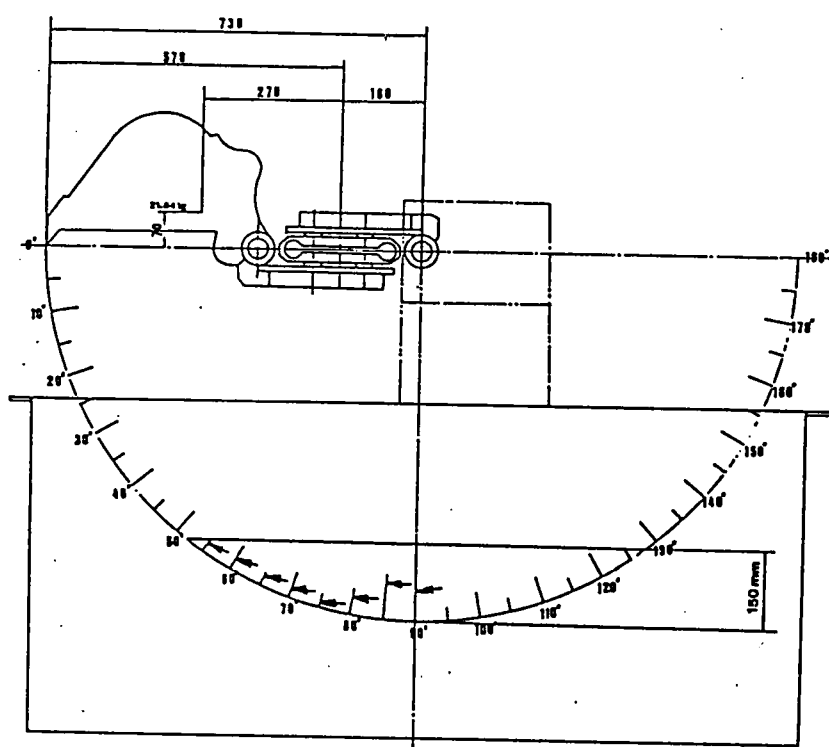


図6-14 バケットの姿勢毎に掘削抵抗の合力の方向と着力点の位置

掘削抵抗の合力の着力点の位置について粘性土の場合にはバケット回転角とともに着力点は刃先からバケット上方に移動する。上り方は図5-17と同じである。

6-4 土と鋼板との摩擦実験

6-4-1 実験の目的

バケットで土を掘削するときいろいろな抵抗がバケットにかかる。実際にはこれらの抵抗，特に摩擦抵抗については非常に測定困難である。しかし，油圧ショベルの能力を向上させるために掘削抵抗を正確に把握することは，掘削抵抗を減らすことについて重要な問題である。掘削抵抗を減らす方法はいろいろあるが，そのうち重要な要素として摩擦抵抗がある。土と鋼板との摩擦特性を正確に把握するために，今回は粘性土について種々の鋼板との摩擦関係などを明らかにするのが本実験の目的である。

6-4-2 実験方法

実験に使用した試料は深草粘土であり，その含水比は 22.21% および 32.93% の 2 種類である。鋼板試料には掘削実験用バケットモデルの材料と同じ，構造用鋼材 S S 4 1 を用い，表面粗さは 4μ ， 10μ および 16μ 程度の 3 種類である。実験方法は第 5 章で述べたのと同様（図 5-18 参照）であり，実験装置は一面せん断試験機のものを用いた。実験は不飽和状態において非圧密非排水条件で等体積試験を行った。上載圧は 4 段階（0.4, 1.2, 2.0, 3.2 kgf/cm²）であり，粘性土のせん断速度は緩速実験（0.25mm/min）と急速実験（2.73 mm/min）であり，粘性土と鋼板とのせん断速度は緩速実験（0.25mm/min）である。以上の条件によって粘性土と粘性土，粘性土と鋼板との摩擦実験を行った。

6-4-3 実験結果および検討

一面せん断実験結果から求めた直圧力 p と摩擦応力 f との関係を図 6-15 に示す。粘性土と鋼板との間の摩擦では，直圧力 p と摩擦応力 f との間には $f = k + p \tan \delta$ （ k ：粘性土の種類，含水比および鋼板の種類や粗さなどによって定まる定数， $\tan \delta$ ：ほぼ粘性土の種類，含水比で決り，鋼板の種類や粗さであまり変わらない定数）の

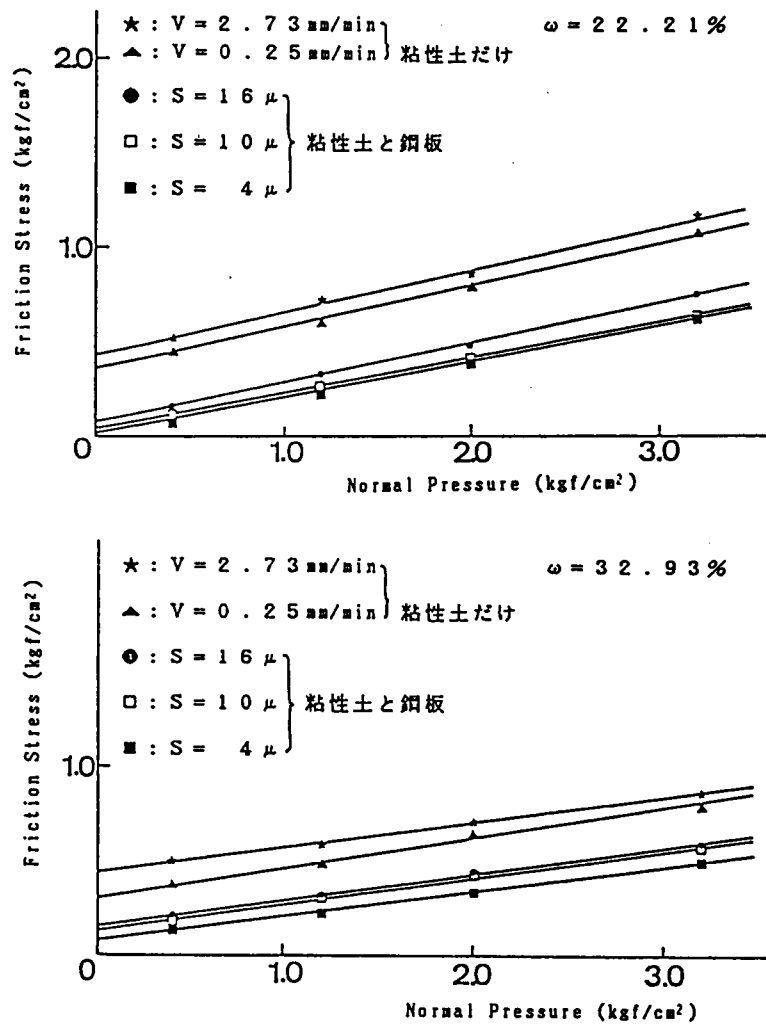


図 6 - 1 5 粘性土と鋼板との摩擦の実験結果

関係がある。故に，次のような式になっている。

表 6 - 3

土の種類	土と鋼板との摩擦条件	せん断破壊条件
粘性土	$f = k + p \tan \delta$	$\tau = C + \sigma \tan \phi$

また， $\tan \delta$ の値は粘性土のせん断破壊条件の $\tan \phi$ に近い値になっている（表 6 - 3 ， 4 参照）。

表 6 - 4

含水比(%)	22.21			32.93		
鋼板粗さ (μ)	16	10	4	16	10	4
$\tan \delta$	0.20	0.18	0.17	0.14	0.13	0.12
$\tan \phi$	0.21			0.14		
$\tan \delta / \tan \phi$	0.97	0.86	0.81	1.00	0.93	0.86

6 - 5 垂直貫入実験

掘削積込機械の代表的機種である油圧ショベルのバケット掘削はブルドーザなどと異なり，機構上限られた掘削距離でバケットに土を効率よくすくい取ることが必要である。実際の掘削動作は水平掘削と垂直貫入掘削の複合動作とみなされる。すなわち掘削初期に見られるバケット爪やエッジによる垂直貫入掘削と貫入したバケットの水平移動による水平掘削である。一般には両者の複合動作と見なされる。本節においては粘性土の場合に刃を垂直方向には自由に動き得るように保持して荷重をのせて掘削実験を行い，くいこみ機構を究明した。

6 - 5 - 1 実験方法

図 6 - 1 6 に示したものは垂直貫入実験装置である。レバー 8 の一端に貫入抵抗測定装置のすくい角 α を自由に変えうる刃 1 をとりつける。レバー 8 の他端にはピンでロードセル 7 と接続する。刃上におもり 2 をのせ，この重さを加減することにより刃にかかる垂直圧力を任意に調節することができる。また，カウンターウエイト 6 をのせる。これはおもり 2 をのせる前に刃先にかかる力を 0 にするためである。回転角計 3 は刃貫入の垂直距離を測り，回転角計 4 は水平距離を測る。土槽 5 はレール上におき，変速モータで駆動されるドラムによってけん引ロープでけん引する。刃としては幅 50 mm を用いる。

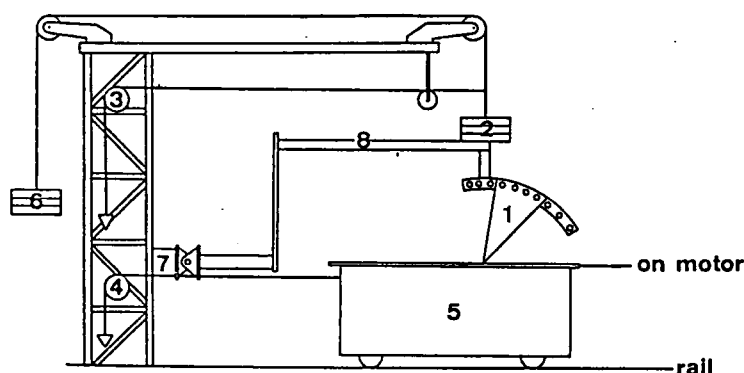


図 6-16 垂直貫入実験装置

6-5-2 実験結果

刃が地盤内に貫入してゆくとき、定常掘削のときと異なり、貫入抵抗が作用する。いまこの貫入抵抗 V を次のようにおく。

$$V = Bbt \, dt/dx$$

B : 刃幅 b は貫入抵抗係数で¹⁾、これが小さいほど刃先は容易に貫入する。この係数は R_s に比例し、すくい角 α 、刃先丸味 r によって異なる。実験結果を整理すると、図 6-17 のようになる。図は横軸にすくい角 α をとり、縦軸に b/R_s をとる。この図からみると、すくい角 $\alpha = 10^\circ \sim 20^\circ$ のときに貫入抵抗係数 b が最小値をとる。すなわちこのとき刃が入りやすい。

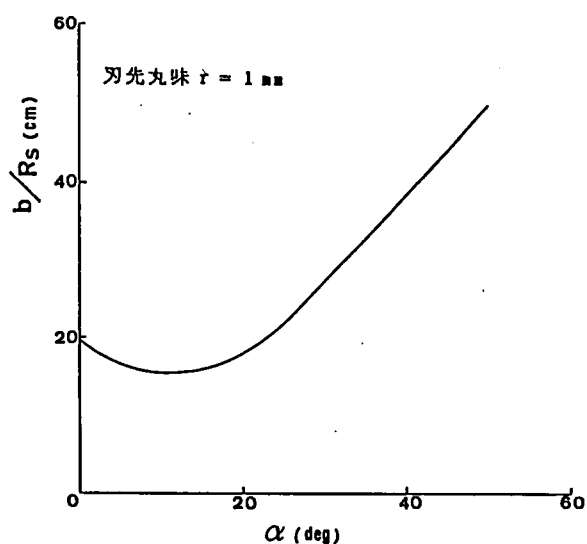


図 6-17 貫入抵抗係数 b

6-6 掘削抵抗の解析

第 5 章においては砂質土の場合には掘削抵抗は土の比掘削抵抗 R_s 、あるいは粒度分布および相対密度を決定すれば畠の掘削機構に関する実験式で推定することができる。本章では粘性土について、二次元掘削抵抗計算式を立て、掘削の力学的諸量（掘削抵抗の大きさ、方向及び着力点の位置など）が、掘削条件（掘削の幾何学的条件など）によりどのように変化するかを明らかにするとともに、掘削実験の結果と比較、

検討を行う。

粘性土の二次元掘削抵抗計算に用いる記号は次のとおりである（図6-18）。

θ : バケット回転角（計測中心線と水平面とのなす角）（度）， Q_B : バケットなどの重さ（kgf）， Q_c : 掘削中バケットに入った土の重さ（kgf）， H_α : 掘削抵抗水平成分（kgf）， V_α : 掘削抵抗鉛直成分

（kgf）， F_t : 掘削抵抗切線分力（kgf）

F_n : 掘削抵抗法線分力（kgf），

$Btb \cdot dt/dx$: 貫入抵抗（kgf）， $Btb \cdot$

$dt/dx \tan \delta$: 貫入抵抗により生じ

た摩擦抵抗（kgf）， B : 掘削幅（cm），

t : 掘削深さ（cm）， b : 貫入抵抗係

数（kgf/cm²）， δ : 粘性土と刃先との

摩擦角（度）， dt/dx : 刃面の軌跡の

接線方向係数。これらの幾何学的関

係から求め、次の式で表わされる。

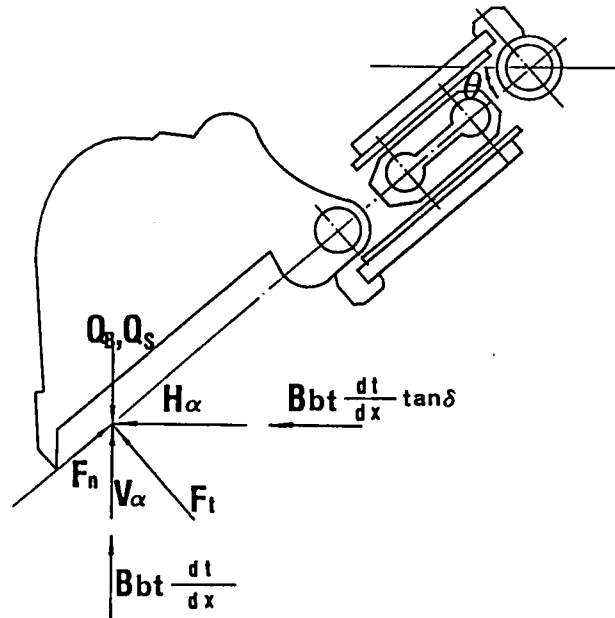


図6-18 バケットにかかる抵抗

$$F_t = (H_\alpha + Bbt \frac{dt}{dx} \tan \delta) / \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) + (-Q_B - Q_c + V_\alpha + Bbt \frac{dt}{dx}) / \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) \quad (6-1)$$

$$F_n = (-Q_B - Q_c + V_\alpha + Bbt \frac{dt}{dx}) / \cos(\frac{\pi}{2} - \theta) - (H_\alpha + Bbt \frac{dt}{dx} \tan \delta) / \sin(\frac{\pi}{2} - \theta) \quad (6-2)$$

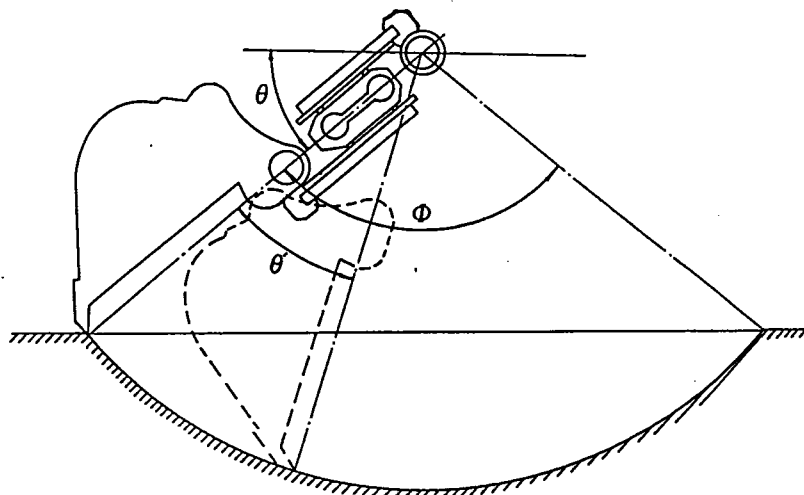


図6-19 バケット回転角

そのうち $H\alpha$ および $V\alpha$ の計算は畠の式による¹⁾。すなわち

$$H\alpha = 1.8 (R_s t_1) B t 10^{-0.22\alpha} \quad \alpha : \text{ラジアン}$$

$$V\alpha = H\alpha \tan(\delta - \alpha)$$

として求められる。

t_1 は R_s 測定するときの深さであるが、 $t = t_1$ が望ましい。

掘削深さは次の式により計算される。

$$t = R \left(\cos\left(\frac{\Phi}{2} - \theta'\right) - \cos\frac{\Phi}{2} \right)$$

ただし、 R ：掘削半径 (cm)， Φ ：土を掘削するときのバケットの全回転角 (度)，

θ' ：土を掘削するときのバケット瞬間回転角 (度) である。(図 6-19 参照)。

実験によって得られた値と式 (6-1)，(6-2) によって計算値との比較検討を行う。

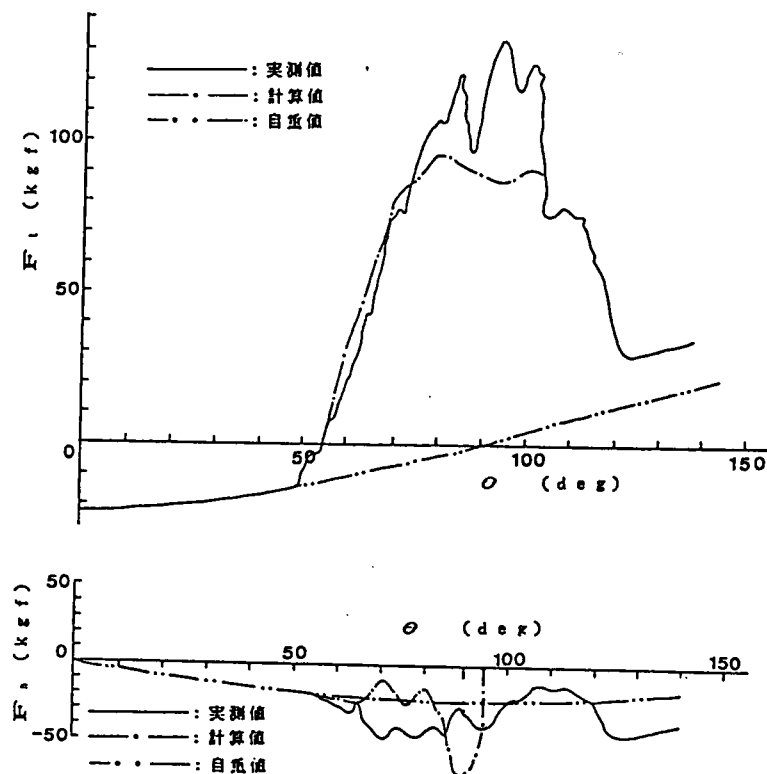


図 6-20 切線抵抗および法線抵抗の計算値と実験値の比較

図 6-20 はバケットの土の掘削するとき、バケットにかかる切線抵抗および法線抵抗の計算値と実験値の比較した一例である。粘性土の掘削抵抗の具体的な数値を求

めるために、各値は次のとおりである。粘性土の比掘削抵抗 $R_s' = 0.168 \text{ kgf/cm}^2$ ($t = 10 \text{ cm}$ のとき、土槽内の実測値)、密度 $\rho_t = 1.3883 \text{ g/cm}^3$ (土槽内の実測値)、粘性土と刃先との摩擦角 $\delta = 7.3^\circ$ (一面せん断実験による)、掘削幅 $B = 30 \text{ cm}$ 、貫入抵抗係数 b は図 6-17 から求められる、以上の数値による計算結果は表 6-5 に示す。

表6-5 切線抵抗 F_t および法線抵抗 F_n の計算値と実測値の比較表

θ	α	t	F_t (kgf)	F_n (kgf)	F_t (kgf)	F_n (kgf)
(deg)	(deg)	(cm)	計算値		実測値	
55	18.5	1.50	1.52	-19.94	18.84	-25.54
60	23.5	4.92	35.38	-20.88	31.36	-29.43
65	28.5	7.86	56.69	-24.22	56.80	-37.38
70	33.5	10.30	83.34	-5.44	86.66	-46.47
75	38.5	12.21	84.72	-20.85	101.32	-44.91
80	43.5	13.59	95.92	-11.48	112.75	-40.57
85	48.5	14.42	93.47	-32.51	123.61	-32.47
90	53.5	14.70	88.16	-82.22	117.99	-40.24
95	58.5	14.42	86.80	0.00	132.04	-29.53
100	63.5	13.59	93.44		122.71	21.92

(表で負は抵抗の方向が下向きである)

粘性土の掘削理論の検討を行うため、計算値と実測値との比較を行った。その結果は図 6-20 に示す。図より次のことが明らかにした。

1) F_t について

①実験から得られた曲線と計算式から求めた理論曲線は傾向は比較的よく一致している。特に、バケット回転角 70° 前の範囲内で理論値と実測値との絶対値はほぼ一致する。バケット回転 75° 後では傾向は一致するが、絶対値は異っている。理論値は実測値より小さい。その差は約 0.3 倍ぐらいになる。ただし、理論の幅広い適用性を示すことを念頭に置いて、単一種類の粘性土で比較を行うのではなく、多くの種類の異なる粘性土に対して理論値との比較を行うべきである。その他、畠の掘削理論をたてる際に同じ粘性土では掘削実験をする前に、比掘削抵抗 R_s を正確に把握するために、数箇所、数回、測定した。一方、計算値は、すくい込み抵抗は入っていないか

ら相違が出る。

2) F_n について

法線抵抗 F_n の理論値曲線と実測値曲線の傾向は大体一致しているが、絶対値は異なる。

6-7 バケット寸法の選択

砂質土の場合、バケット最適形状はバケット容量が決まっている時、単位掘削土量当りの消費仕事量を最小にするところによって決められる。粘性土の場合でも、同様方法で検討した。その結果は付表2に示す。図6-21に示したものは計算結果から求めた E （掘削土量 1 m^3 当りの消費仕事量）と B （バケット幅）と R （掘削半径）との関係である。これらの関係には砂質土の場合と同じ関係があるため、その結果も同様である。すなわち、 Φ （土を掘削する時のバケット全回転角）が $85^\circ \sim 110^\circ$ 間では R と B との値の差が少ない方がよいと考えられる。

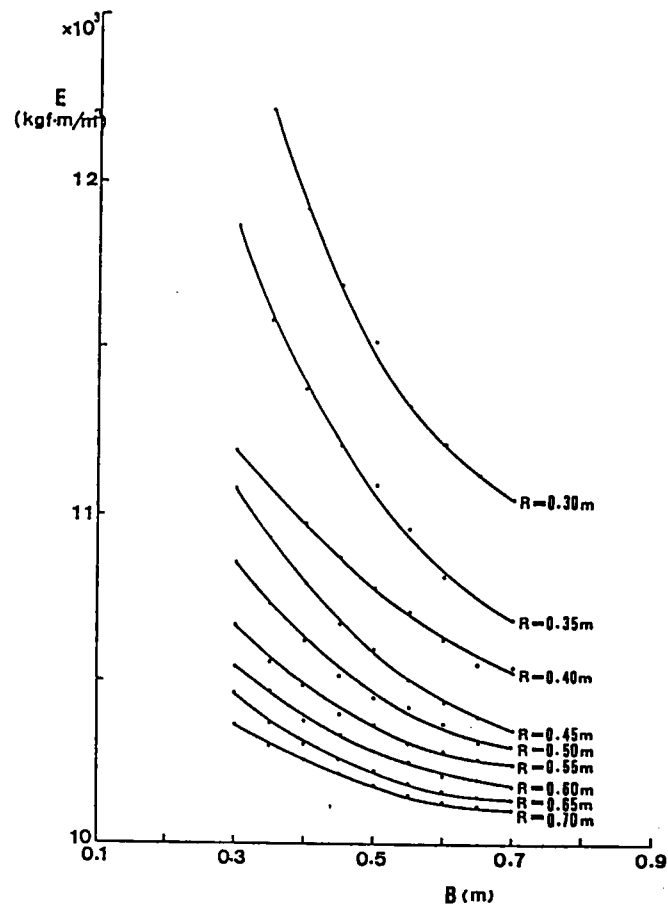


図6-21 $q = 0.018\text{ m}^3$ の E と B , R との関係

6-8 実際の油圧ショベルとの対応

第5章で述べたように油圧ショベルを設計する際に外力（掘削抵抗）を正確に把握することができなければ、性能よい油圧ショベルを設計、製作することができない。しかし、現状ではこの点について未解明である。

本章では油圧ショベルのバケット掘削機構を土質力学的観点からとりあげ種々の掘削条件による粘性土の掘削実験を行った。本実験結果によると、粘性土について掘削によってバケットにかかる掘削抵抗の大きさ、方向および着力点位置などが解明された。また、畠の掘削機構に関する理論をバケット掘削に適用して考察を行った。さらに、計算値と実測値との比較を行った。その結果、本実験の結果をそのまま用いて実際の油圧ショベルのバケット掘削抵抗をある程度推定することができる。そのとき、掘削解析手順は図6-22に示したとおりである。

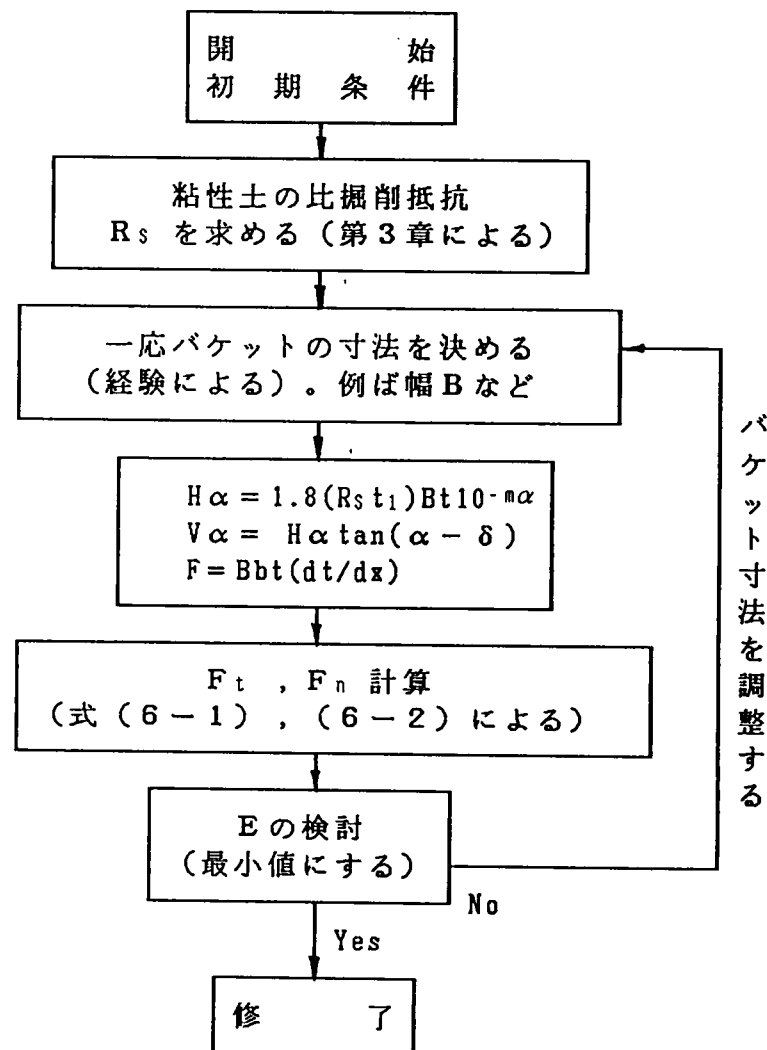


図6-22 掘削抵抗解析手順

6-8 結論

油圧ショベルのバケットで粘性土を掘削するときの掘削機構を究明するために、粘性土の掘削実験的考察および理論的解析を行った結果、次のことが明らかになった。

(1) 掘削抵抗 F_t と F_n の大きさについて 粘性土を掘削する場合には切線抵抗 F_t 、法線抵抗 F_n とも大きさは掘削条件などに関係するが、一般的には次のようになっている。すなわち、① F_t は掘削深さ t の増大とともに増加する、その増加傾向は直線的である。② F_n は掘削深さ t の変化とともに変化する。変化の傾向は実験中には認められなかった。③ 爪数が変わると、爪のすき間も変わる。爪のすき間と爪幅との比は1.9倍の場合の切線抵抗 F_t が4.5倍の場合の切線抵抗 F_t より大きい。その増加率は約1.28倍になる。④ 爪のない場合の切線抵抗 F_t は爪のある場合の切線抵抗 F_t より大きくなる。その比は約1.3倍になる。⑤ 爪形が変化すると、掘削抵抗も変化する。実験結果により、実際作業の場合には図6-12 a 爪形（にげ角が大きい方）を採用したほうがよいと考えられる。⑥ 法線抵抗 F_n は掘削条件（掘削深さ、爪数、爪有無、爪形など）によって異なるが、全体から見ると、その大きさの変化は切線抵抗 F_t より小さい。その2つ抵抗の比（ F_n / F_t ）はバケット回転角によって異なるが、全体から見ると、約0～0.35範囲に変化する。

(2) 掘削抵抗 F_t および F_n の方向について 粘性土の掘削においては掘削抵抗の方向は次のようになることがわかった。① 切線抵抗 F_t の方向は掘削過程中に変わらない、すなわち、バケットに向く。② 法線抵抗 F_n の方向は掘削条件によってある程度変化している。バケット回転 90° 前に回転中心に向き、バケット回転 90° 以後に回転中心から外の方に向く。③ 掘削抵抗合力の作用方向の変化はバケット回転角によって異なるが、一般的にその方向は反時計回りとなることも判明した。

(3) 着力点の位置について 掘削抵抗着力点の位置（バケット刃先から着力点までの距離 L ）は掘削中、バケット回転角によって変化しているが、その着力点が変わっても刃先の付近にある。（以上を求めてみる、図6-23に示す）

(4) バケット容量が決っている時、単位掘削土量当りの掘削仕事を小さくするためには、掘削角度は $85^\circ \sim 110^\circ$ の範囲で、BとRとの差は少ない方がよいことがわかった。

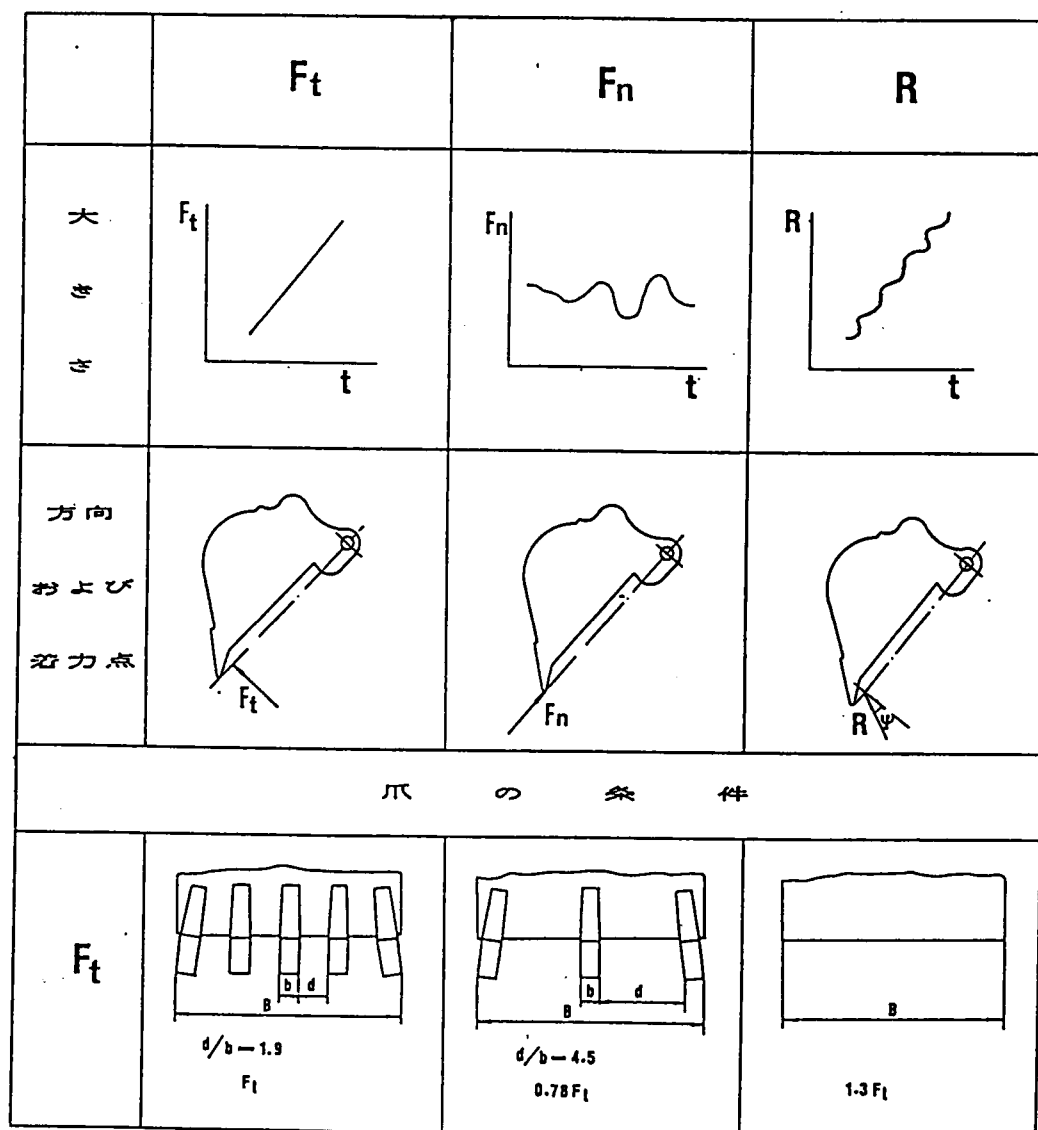


図 6 - 2 3

以上述べたように，土の特性値である土の比掘削抵抗 R_s を求めれば，畚の掘削理論により掘削抵抗を論じることができる。すなわち，本研究の実験結果および解析手順によりある程度掘削抵抗を推定することができる。

油圧ショベルを設計するにあたって，外力（掘削抵抗）をどのように計算するか，それに，外力はどのように変化するか。更に，掘削条件（例えば爪本数の変化，爪形の変化，爪の有無など）が変わると，設計の際に油圧ショベルの能力はどうなるかな

どについて今まで未解明で自分の理解の程度によって設計するのが現状であった。故に、製作した油圧ショベルはその掘削能力が各種類土に対して適当かどうかわからないであろう。では「性能の良い油圧ショベルを世に送出す」ということの保証はどこにあるのか。

前章砂質土のバケットの掘削機構および本章粘性土のバケット掘削機構について実験的考察および解析を行った。更に、この機構を究明した。以上述べたの未解明点が本研究では、すでに明らかにした。故に、本研究は実際の業務に役立つと言って過言でないだろう。

参考文献

- 1) 畠 昭治郎著：建設機械学，鹿島出版会，PP151～158，1987年

第7章 油圧ショベル掘削時の運動機構の解析

7-1 概説

「油圧ショベルの掘削能力」は油圧ショベルを設計，製作するにあたり，その機械の性能を決定する最大のテーマである。すなわち，アタッチメントの寸法、機体の大きさ、重量、エンジン出力、油圧ポンプの圧力、流量、および車体の安定性などからみて適当な掘削力，あるいは，掘削能力とはいかにあるべきかという問題は油圧ショベル開発当初からの課題であった。「土」そのものを取扱うことから困難な要素が多く，その解明は十分行われておらず，「油圧ショベルの掘削」に関する問題は経験と勘に頼って処理している。特に，掘削能力に影響するアタッチメント寸法に関する問題はアナロジー的方法と経験計算方法が使われているのが現状であるといっても過言ではない。

土の掘削実験（第5章および第6章）により，掘削ときの掘削抵抗などが明らかになった。また，土の比掘削抵抗と土の諸特性値との関係も明らかになった。

本章においては油圧ショベルの掘削力を表わす方法，アタッチメントを設計する前に各機構の主なパラメータの計算方法および掘削方法などについて述べる。

7-2 掘削力

油圧ショベルが作業（掘削）を行う際に，油圧ショベルと土質との関係について考えてみると，土は被加工物である。被加工物としてみると，ショベルは土のもつ内部結合力をゆるめて崩し（掘削）ている。実際に掘削する場合には掘削力が土のもつ内部結合力（抵抗）を克服してショベルの掘削能力を発揮するのである。もし，掘削力が掘削抵抗より小さければ掘削能力が低下するか，土を掘削することができない。掘削力が作業（掘削）中には絶えずフロントアタッチメント姿勢により変化している。故に，掘削力は土に関するもののほかに油圧ショベル機体およびアタッチメント寸法などに関係するものである。

7-2-1 掘削力発揮の条件¹⁾²⁾⁵⁾

油圧シリンダの外形図を図7-1に示す。油圧シリンダは掘削時に各油圧シリンダが主働的（あるいは注油的）に作動するし、また受働的（あるいは逃油的）に作動する。図7-2に示すものはブームシリンダシステムである。これを例として説明すると、ブーム油圧シリンダ内に油圧ポンプから圧力を供給すれば、この機構の働く様式を主働的という（例えば、ブームシリンダが伸びる場合、図7-2 aの略図に示す通りである。その時 油圧シリンダの圧力の最高値がリリーフ弁の設定圧力値にまで

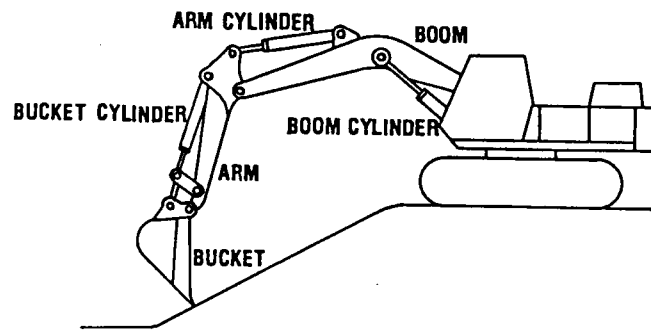


図 7-1 油圧シリンダ

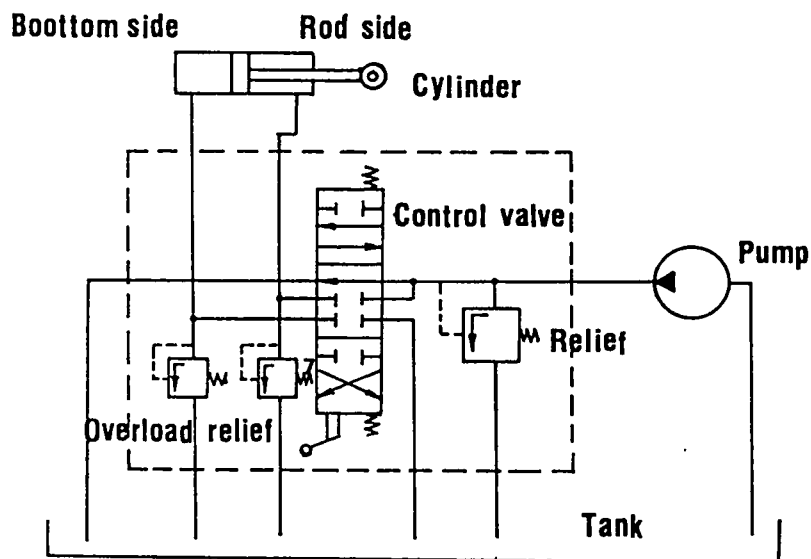


図 7-2 ブームシリンダシステム

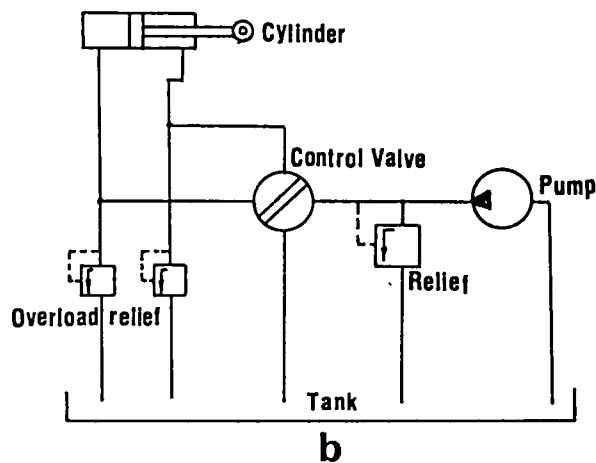
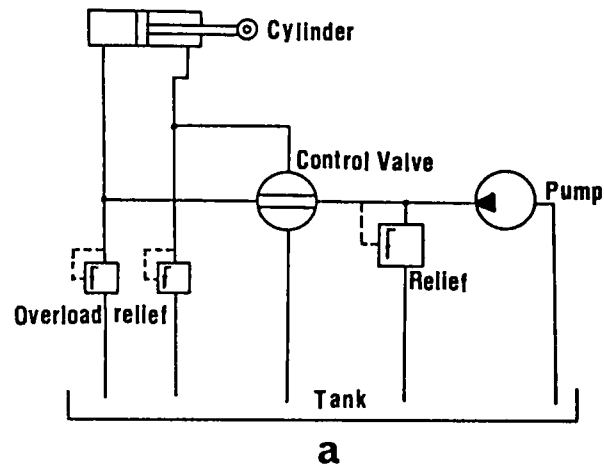


図 7 - 2 a , b ブームシリンダシステム略図

到達する。これとは逆に、もし、油圧シリンダの両側（すなわち、ボトム側とロッド側）は油圧システムの高圧回路（図 7 - 2 b）と戻る回路ができれば、このとき、もしブームシリンダが外力を受けると考えれば、この機構の働く様式を受働的という。この場合にはシリンダのボトム側あるいはロッド側の圧力は背圧力である。この背圧力の最高値がオーバーロード・リリーフ弁の設定圧力値にまで至る。

掘削する過程に、油圧ショベル本体がすべりを生ずることがある。掘削力の水平

分力が履帯と地面との摩擦力を克服してはじめてすべり現象が生ずる。

掘削中に油圧ショベルがバランスを失って転倒することがある。

以上述べたことをまとめると油圧ショベルが掘削力を発揮するということは5つの制限要素を受けることになる。すなわち

① ブームシリンダの保持能力（オーバロード・リリーフ弁の設定圧力）が主働シリンダ出力（リリーフ弁の設定圧力）の十分な発揮を制限する。

② バケットで土を掘削する時，アームシリンダの保持能力（オーバロード・リリーフ弁の設定圧力）がバケットシリンダ主働力の十分な発揮を制限する。または，アームで土を掘削する時，その主働出力が十分に発揮される。

③ バケットで土を掘削する時，その主働出力が十分に発揮される。または，アームで土を掘削する時，バケットシリンダの保持能力（オーバロード・リリーフ弁の設定圧力）がアームシリンダ主働力の十分な発揮を制限する。

④ 油圧ショベル履帯と地表面との附着力が主働シリンダの出力の十分な発揮を制限する。

⑤ 掘削力の垂直分力は油圧ショベル機体重量にとってバランスをくずして前，あるいは後に転倒する可能性がシリンダの出力の十分な発揮を制限する。

以上述べたことをまとめて図7-3に示す。

7-2-2 最大掘削力の表現方法

油圧ショベルの掘削能力は現在どの国でも最大掘削力で表わされている。この最大掘削力はバケットシリンダによる計算値である。この理論値は以上述べたように5つの制限要素を受けるため，実際にはこの理論値はどの程度，どの範囲内発揮できるのかわからない。故に，最大掘削力で油圧ショベルの性能を示すことはあまり適当ではない。そのために新しい方法で油圧ショベルの性能を示すことを提案する。この新しい方法とは油圧ショベル作業時の姿勢によりそのときの掘削力を示すことである。

油圧ショベルの作動範囲内で（地表面以下の部分を取る）制限条件により掘削力を計算して具体的な数字で掘削能力を示す。この場合にはアタッチメント各油圧シリンダの長さにより掘削力は異なるので，計算するにあたって必ず各油圧シリンダの長さ（

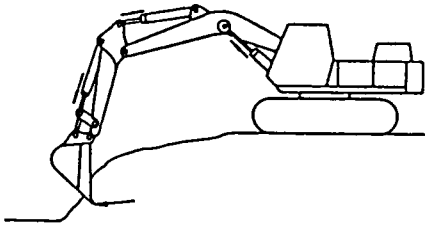
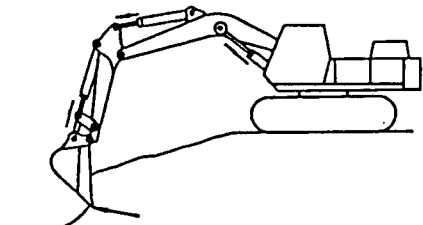
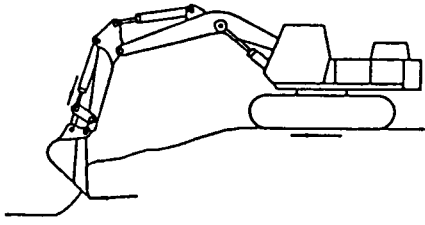
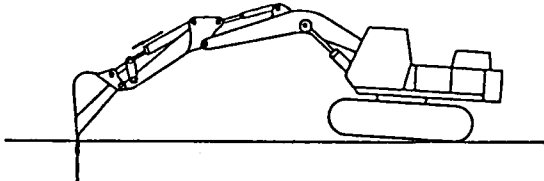
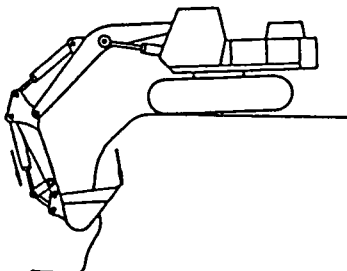
	主 動 力	制 限 条 件
	バケットシリンダ ブームシリンダ	アームシリンダ ブームシリンダ
	アームシリンダ	バケットシリンダ ブームシリンダ
	バケットシリンダ あるいは アームシリンダ	機体のすべり
	バケットシリンダ あるいは アームシリンダ	後に転倒
	バケットシリンダ あるいは アームシリンダ	前に転倒

図 7 - 3 各種制限条件

すなわち，掘削姿勢）を決定しなければならない（図 7-4 に示す）。

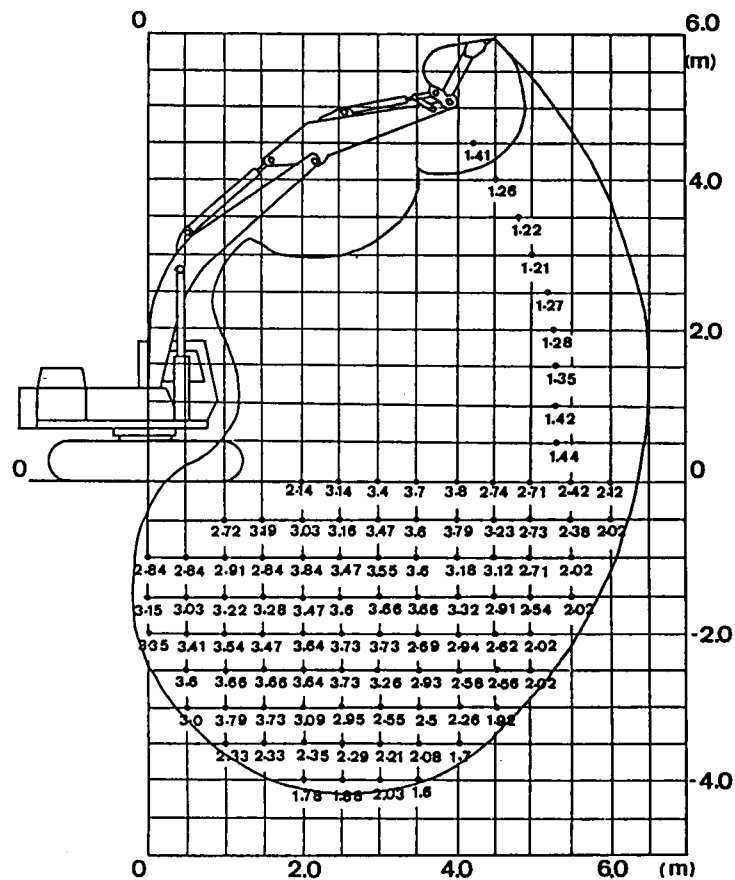


図 7-4 あるバケット容量 0.25 m³油圧ショベルの掘削力 (tf) 発揮範囲図

7-3 アタッチメント各機構の主なパラメータの計算方法

油圧ショベルのアタッチメントはブーム、アーム、バケットなどから構成される。各機構寸法の決定方法は油圧ショベルを設計するにあたり 1 つの大きなテーマである。従来，多くの研究者が行っていることは経験的な計算方法をよく使っていることである。本章においては作業範囲とブーム、アーム、バケットの相互寸法から考えて各機構寸法の新しい計算方法を提案する。

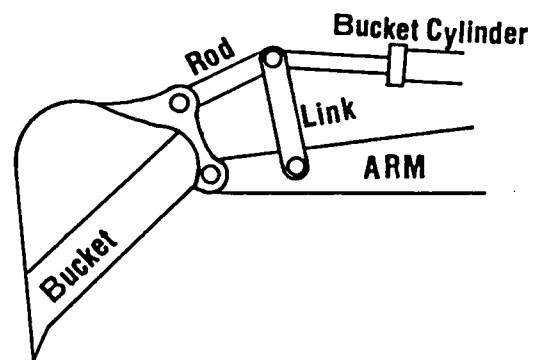


図 7-5 バケット機構

7-3-1 バケット機構

バケット機構は図7-5に示すような多節リンク列を構成する。バケットは平面座標で運動する時、その位置がブームシリンダ長さ、アームシリンダ長さおよびバケットシリンダ長さの関数になる。以下、バケットのアームに対する相対的な運動を解明する。

バケットで土を掘削する時に掘削抵抗が掘削深さによって変化している。この時掘削力の変化は掘削抵抗の変化に適応することが望ましい。また、バケットシリンダ最小力で掘削抵抗を克服することも望ましい。故に、両者（掘削抵抗とバケットシリンダ能力）間の適当な伝動比を求めることができれば、以上が満足される。

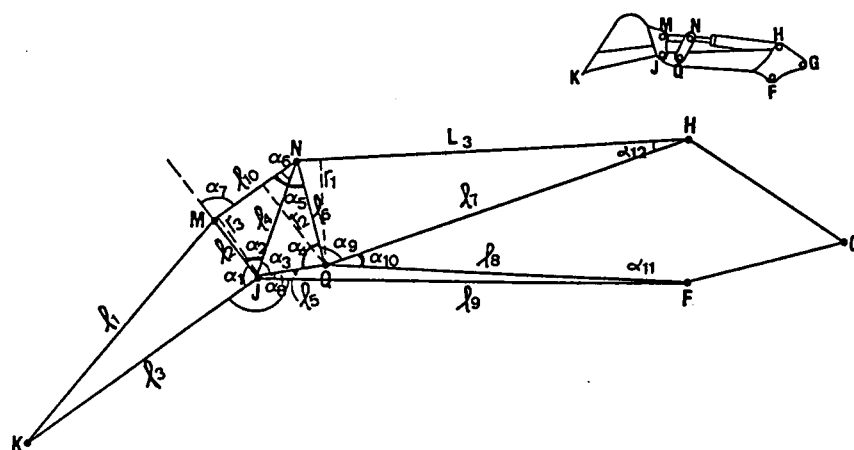


図7-6 バケットリンク機構

図7-6に示すように△NQHにおいて

$$\angle NQH = \alpha_9 = \cos^{-1} \{ (l_6^2 + l_7^2 - L_3^2) / 2 \times l_6 \times l_7 \} \quad (7-1)$$

$$\angle NHQ = \alpha_{12} = \cos^{-1} \{ (L_3^2 + l_7^2 - l_6^2) / 2 \times L_3 \times l_7 \} \quad (7-2)$$

Q点においては

$$\begin{aligned} \angle NQJ = \alpha_4 &= 2\pi - \angle NQH - \angle HQF - \angle JQF \\ &= 2\pi - \alpha_9 - \alpha_{10} - (\pi - \angle FJQ - \angle JFQ) \\ &= \pi - \alpha_9 - \alpha_{10} - \alpha_8 - \alpha_{11} \end{aligned} \quad (7-3)$$

△NQJ において

$$\begin{aligned} NJ &= l_4 = (JQ^2 + NQ^2 - 2 \cdot JQ \cdot NQ \cdot \cos \alpha_4)^{1/2} \\ &= (l_5^2 + l_6^2 - 2 \cdot l_5 \cdot l_6 \cdot \cos \alpha_4)^{1/2} \end{aligned} \quad (7-4)$$

$$\begin{aligned} \angle NJQ = \alpha_3 &= \cos^{-1} \{ (NJ^2 + JQ^2 - NQ^2) / 2 \times NJ \times JQ \} \\ &= \cos^{-1} \{ (l_4^2 + l_5^2 - l_6^2) / 2 \times l_4 \times l_5 \} \end{aligned} \quad (7-5)$$

△MJN において

$$\begin{aligned} \angle MJN = \alpha_2 &= \cos^{-1} \{ (MJ^2 + NJ^2 - MN^2) / 2 \times MJ \times NJ \} \\ &= \cos^{-1} \{ (l_2^2 + l_4^2 - l_3^2) / 2 \times l_2 \times l_4 \} \end{aligned} \quad (7-6)$$

$$\begin{aligned} \angle MNJ = \alpha_6 &= \cos^{-1} \{ (KJ^2 + NJ^2 - MJ^2) / 2 \times KJ \times NJ \} \\ &= \cos^{-1} \{ (l_3^2 + l_4^2 - l_2^2) / 2 \times l_3 \times l_4 \} \end{aligned} \quad (7-7)$$

故に

$$\begin{aligned} \angle MNQ = \alpha_5 &= \cos^{-1} \{ (NJ^2 + JQ^2 - JQ^2) / 2 \times NJ \times NQ \} + \angle MNJ \\ &= \cos^{-1} \{ (l_4^2 + l_6^2 - l_5^2) / 2 \times l_4 \times l_6 \} + \alpha_6 \end{aligned} \quad (7-8)$$

$$\alpha_7 = \angle MJN + \angle MNJ = \alpha_2 + \alpha_6 \quad (7-9)$$

バケットシリンダはQ点に作用する腕の長さが

$$\begin{aligned} r_1 &= NQ \times \sin(\alpha_9 + \alpha_{12}) \\ &= l_6 \times \sin(\alpha_9 + \alpha_{12}) \end{aligned} \quad (7-10)$$

となり，アイドリング NM はQ点に作用する腕の長さが次式となる。

$$r_2 = l_6 \times \sin \alpha_5 \quad (7-11)$$

アイドリング NM はJ点に作用する腕の長さが次式となる。

$$\begin{aligned} r_3 &= MJ \times \sin \alpha_7 \\ &= l_2 \times \sin \alpha_7 \end{aligned} \quad (7-12)$$

故に バケットリンク機構の総伝動比

i (= バケット刃先の掘削力 / バケットシリンダ出力) は

$$\begin{aligned}
 i &= (r_1 \times r_3 / r_2 \times l_3) \\
 &= (l_2 \times l_6 \times \sin \alpha_7 \times \sin (\alpha_9 + \alpha_{12}) / l_6 \times l_3 \times \sin \alpha_5) \\
 &= (l_2 \times \sin \alpha_7 \times \sin (\alpha_9 + \alpha_{12}) / l_3 \times \sin \alpha_5) \quad (7-13)
 \end{aligned}$$

となる。

以上の計算式により、バケットリンク機構の伝動比はバケットシリンダ長さの関数とする。理論から眺めると、バケットシリンダ長さが決まれば、伝動比が得られる。しかし、バケットリンク機構の伝動比はバケット各リンク長さによって異なる。これらのリンク長さは最適寸法が得られなければ、その結果は伝動比も最適値ではない。バケット掘削力の変化はバケットで土を掘削する時の掘削抵抗の変化に適応するために、適当な伝動比が望ましい。実際問題として、最適伝動比の計算は非常に困難であり、また、非常にわずらわしい。故に、コンピュータによって計算し、精確、適当な伝動比を得ることができる。三種類油圧ショベル（バケット容量：0.15m³, 0.25m³, 1.6m³）のバケットリンク機構を計算して適当な伝動比が得られた。すなわち、バケット各リンクの最適な寸法が得られた。その結果を整理して、それらの相互関係を図7-7に示す。図から考えると、次の重要なことがある。バケット容量が異ってもそれぞれ

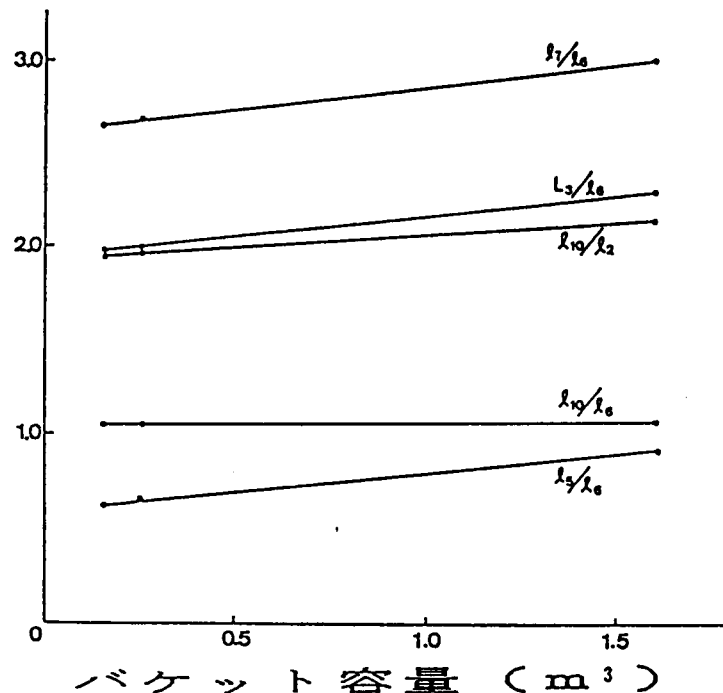


図7-7 バケット各リンクとバケット容量との関係

の長さ比の関係が直線になる。また、それらの直線の傾斜はほぼ一定となる。故に、油圧ショベルを設計するにあたって、バケット容量が決まれば、図7-7により、バケット各リンク長さが決められる。したがって、適当な伝動比も決められる。

7-3-2 アーム機構¹⁾²⁾

アームとブームの連結点の位置を決めることは油圧ショベルを設計するにあたり1つの研究テーマである。国内外のいくつかの油圧ショベルアタッチメントのパラメータを分析することを通じて、アームとブーム連結点の位置を決めることについては統一的法則はないことがわかった。

アームとブームの連結点の位置を決める重要な条件は掘削力が急に減少する時、あるいはバケットが制動する時に連結点にかかる慣性力がすくないことを望ましい、本節においては接続点を決めることについて検討する。

計算するに当たって次の仮定を行う。

- (1) 長さ L のアームの重量は全長に等分布する。
- (2) バケット重量がアーム先端 J 点に集中する(図7-8参照)。

以上の仮定による計算略図を図7-8に示す。図中の B 、 J 、 O はアームの質量 m_1 、バケットの質量 m_2 および総質量 m のそれぞれの重心である。 F 点はアームとブームとの連結点である。アームは F 点を中心として回転する。重心 O の位置とアーム回転

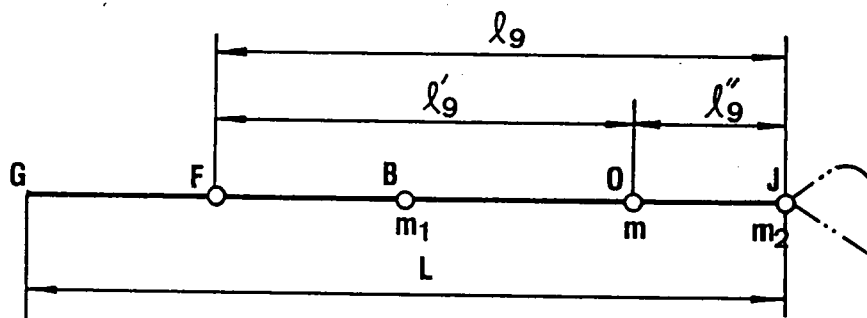


図7-8 アーム計算図

中心 F との位置が一致しないので、掘削力が変化すると、アームとバケットともに加速度が生じる。このために重心 O において慣性力と慣性モーメントが生ずる。もし、

掘削力が変化する時，ある不動点があれば，アームとブームとの連結点をこの点におけば，一番適当である。この点を衝撃中心という，図 7-8 で F 点を衝撃中心であるとする，F 点と O 点との距離は

$$\begin{aligned} FO = \ell'_9 &= \rho^2 / JO - JO \\ &= \rho^2 / \ell''_9 - \ell''_9 \end{aligned} \quad (7-14)$$

ここに ρ : J 点に対する回転半径である。

F 点と J 点との距離は次の式により得られる。

$$FJ = \ell_9 = \rho^2 / L_3 \quad (7-15)$$

アームの J 点に対する慣性モーメントは次の式となる。

$$\begin{aligned} I &= \int_0^L X^2 \, d m_1 = \int_0^L X^2 \, m_1 \, dx / L = | m_1 X^3 / 3 L |_0^L \\ &= m_1 L^2 / 3 \end{aligned} \quad (7-16)$$

そのほか

$$I = (m_1 + m_2) \rho^2 \quad (7-17)$$

となる。

アームの質量はアームの二分の一のところに集中している。J 点に対して

$$m_1 L^2 / 2 = (m_1 + m_2) \ell''_9 L \quad (7-18)$$

となる。式 (7-16) , (7-17) , (7-18) を整理すると，次のような式となる。

$$\rho^2 = m_1 L^2 / 3 (m_1 + m_2) = 2 L \ell''_9 / 3 \quad (7-19)$$

式 (7-15) , と式 (7-19) により次のような式が得られる。

$$FJ = \ell_9 = 2 L / 3 \quad (7-20)$$

故に，アームとブームとの接続点の位置を決めるとき， ℓ_9 / L 値は必ず 0.67 にならなければならない。

実際の場合には，アームの G 点はアームシリンダとつながる。以上の計算の中に，アームシリンダを考えていなかった。その主な理由は，掘削力が減少する時，あるいは，バケットが制動する時に連結点にかかる慣性力がすくなくれば，アームの G 点にかかる力も小くなる。故に，アームシリンダにかかる力も小くなる。こうすれば，バ

ケットで土を掘削する時に，アームシリンダは主動シリンダ（すなわち，バケットシリンダ）に対する制限が少なくなる。故に，主動シリンダの能力が十分に発揮される。したがって，掘削力が十分に発揮される，油圧ショベルの性能も高められる。

7-3-3 ブーム機構²⁾³⁾⁴⁾

(1) ブーム持上げ機構要素の確定

油圧ショベルブーム機構は一般に4リング並列機構を構成している。ブームピンCとEおよびブームシリンダピンD（図7-9参照）の位置は掘削力の発揮に大きな影響を与える。故に，この3点を正確に選択することは重要である。本節においてはこの3点の相互関係および寸法などについて説明する。

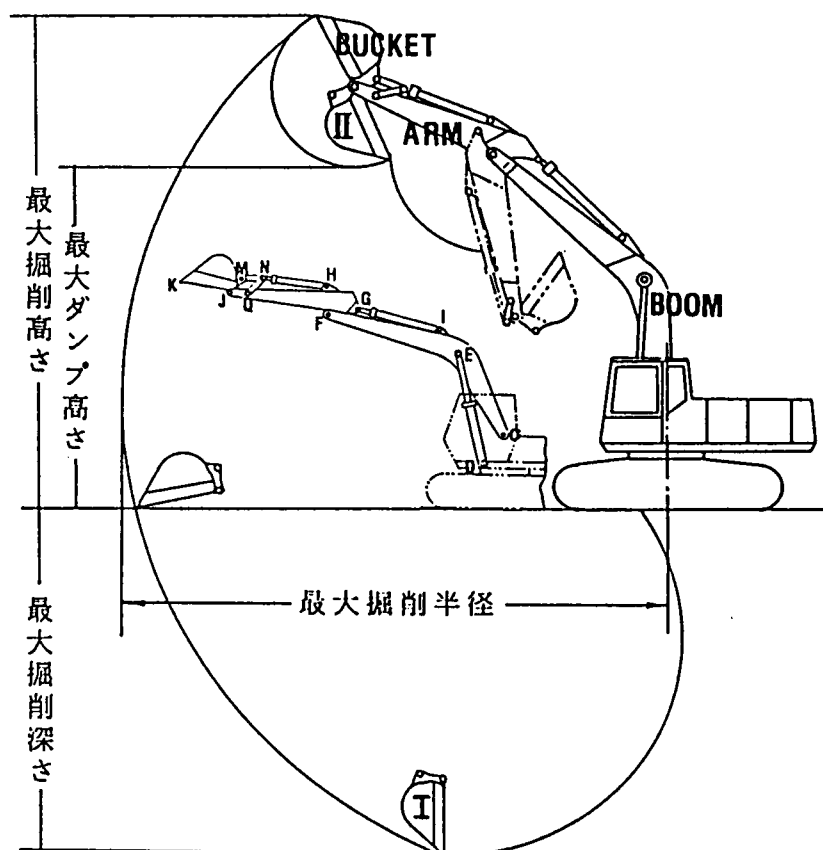


図7-9 油圧ショベルアタッチメントおよびブーム機構

1 0 9

腕の長さ $C_{P1} < C_{01}$ になる。 C_2 と $C_{0'}$ 間に C_3 点を取ると、腕の長さ $C_{P3} > C_{03}$ になる。以上の場合にはブーム回転角 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ になるが、腕の長さは等しくない。

一般の場合には、ブームピンC点の位置は以下の条件により決定する。①ブームシリンダ最小長さ（図7-9のⅠ位置）のとき、掘削力を十分発揮するため、ブームシリンダ保持能力が大きい。②掘削完了、バケットに土が一杯になると、ブームシリンダ最大長さ（図7-9のⅡ位置）のとき、持ち上げ能力が大きい。そのため、 $C_{P2} = C_{02}$ になる場合 C_2 をブームと機体との接続点にすれば、一番有効である。

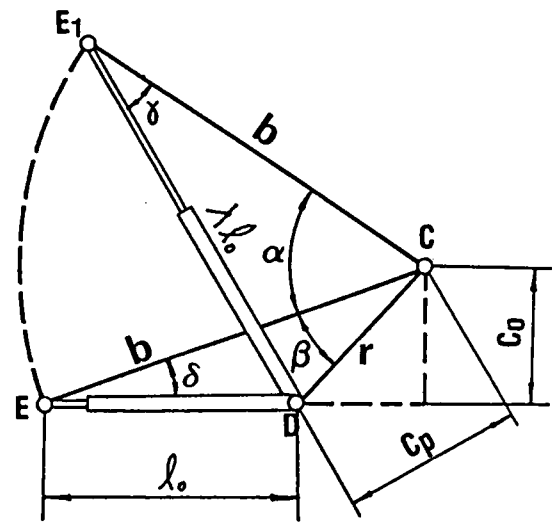


図7-11 ブームとブームシリンダとの関係

r が変わると、ブーム回転角 α と腕の長さとも変化する。ある範囲内に r が増加すれば、腕の長さも増大するが、ブーム回転角は逆に減小する。ブームとブームシリンダとの関係は（図7-11参照）次の式で表わす。

ブームが上限位置にある場合、 $\triangle CDE_1$ において

$$l^2 = DE_1^2 = b^2 + r^2 - 2br \cos(\alpha + \beta)$$

すなわち

$$\cos(\alpha + \beta) = (b^2 + r^2 - l^2) / 2br \quad (7-21)$$

となる。

ブームが下限位置にある場合、 $\triangle CDE$ において

$$l_0^2 = DE^2 = b^2 + r^2 - 2br \cos \beta$$

すなわち

$$\cos \beta = (b^2 + r^2 - l_0^2) / 2br \quad (7-22)$$

となる。

△ CDE₁ において

$$r / \sin \gamma = \ell / \sin (\alpha + \beta)$$

$$\sin \gamma = r \sin (\alpha + \beta) / \ell$$

△ CDEにおいて

$$r / \sin \delta = \ell_0 / \sin \beta$$

$$\sin \delta = r \sin \beta / \ell_0$$

腕の長さは次の式になる

$$C_0 = b \sin \delta = b r \sin \beta / \ell_0$$

$$C_P = b \sin \gamma = b r \sin (\alpha + \beta) / \ell$$

腕の長さ比 k は

$$K = C_P / C_0 = \ell_0 \sin (\alpha + \beta) / \ell \sin \beta \quad (7-23)$$

もし $r / \ell_0 = s$, $b / \ell_0 = t$, $c_0 / \ell_0 = u$ とすれば, それぞれを式 (7-21) に代入すると,

$$\begin{aligned} \cos (\alpha + \beta) &= (b^2 + r^2 - \ell^2) / 2 b r \\ &= (t^2 \ell_0^2 + s^2 \ell_0^2 - \lambda^2 \ell_0^2) / 2 t \ell_0 s \ell_0 \\ &= (t^2 + s^2 - \lambda^2) / 2 t s \end{aligned} \quad (7-24)$$

となり, それぞれを式 (7-22) に代入すると,

$$\cos \beta = (t^2 + s^2 - 1) / 2 t s \quad (7-25)$$

t と s は △ CDE₁ と △ CDE から得られる。

故に

$$b + r > \ell_0$$
$$t + s > 1$$

$b > r$ のとき

$$b - r < \ell_0$$

よって

$$t - s < 1$$

$b < r$ のとき $r - b < l_0$

よって $s - t < 1$

u は次の式のように表わされる。

$$u = C_0 / l_0 = b r \sin \beta / l_0^2 = s t \sin \beta \quad (7-26)$$

よって

$$\begin{aligned} K = C_p / C_0 &= l_0 \sin(\alpha + \beta) / l \sin \beta \\ &= l_0 \sin(\alpha + \beta) / \lambda l_0 \sin \beta \\ &= \sin(\alpha + \beta) / \lambda \sin \beta \end{aligned} \quad (7-27)$$

s と t の変化および式 (7-21), (7-22), (7-23), (7-26) (7-27) により, $\alpha(S, t)$, $u(S, t)$, $k(S, t)$ の関数関係を求めることができる。

以上の関係により, s の値および腕の長さ比 k の値は次の値になると, 最適値である。すなわち, $s = r / l_0 = 0.4 \sim 0.5$, $k = C_p / C_0 = 1$ 。

故に, s の値と k の値により, ブームと機体との接続点 C およびブームシリンダと機体との接続点 D 間は次の値となるべきである (図 7-11 参照)。

$$CO / CD = h / r = 0.7 \sim 0.71$$

(2) 適当なパラメータの計算

油圧ショベルアタッチメントはブーム, アーム, バケットおよび各シリンダなどから構成されたものである。故に, 適合のブーム持上げ機構のパラメータはアタッチメント全体から考えなければいけない。本節においては作業範囲およびアタッチメント全体から考えて適当なパラメータを検討する。

ブーム機構最適パラメータは作業範囲 (最大掘削深さ H_k , 最大ダンプ高さ H_b など) によって計算を行う。

図 7-12 幾何関係により次のような関係がある。

ブーム長さ：

$$\begin{aligned}l_1 &= (h_k + h_H) / 2 \sin(\phi_0 / 2) \\&= (H_b + l_2 + l_3 + H_k - l_2 - l_3) / 2 \sin(\phi_0 / 2) \\&= (H_b + H_k) / 2 \sin(\phi_0 / 2)\end{aligned}\tag{7-32}$$

となる。

ブームシリンダの開始（最短）と最終（最長）の極限長さは次の式となる。

$$l_0 = (b^2 + r^2 - 2br \cos \beta)^{1/2}\tag{7-33}$$

$$l = \{b^2 + r^2 - 2br \cos(\phi_0 + \beta)\}^{1/2}\tag{7-34}$$

よって ブームシリンダストロークは次の式となる。

$$s = l - l_0\tag{7-35}$$

7-4 合理的掘削方法

油圧ショベルで土を掘削する時に，一般的にバケットで土を掘削する方法が多い。これによって掘削する場合にはサイクルが短くなり，油圧システムのエネルギーも十分に利用される。しかし，バケットでの掘削方法もそれぞれ方法である。したがって合理的な掘削方法に関する研究はきわめて重要な問題である。本節ではバケットで掘削するとき合理的な掘削方法について検討する。

7-4-1 掘削方法¹⁾²⁾

掘削作業は整形した斜面ですすめる。斜面勾配は 40° ぐらい。土の掘削方法はバケットでの方法であり，同時に，バケットに土が一杯になるためにアームが適当に回転する。掘削方法は 3 種類である（図 7-13 に示す）。

（a）図 7-13 a はバケットのみで掘削方法である。掘削手順は下から上へ順次に掘削していく。土を掘削するときの最初は最大掘削深さ t_{max} 所からすすめる。掘削開始には縦方向に沿って下から上まで四つの穴を順次に掘削し，その後掘削した所の左，右両側に同様な方法で掘削する。

（b）図 7-13 b にはバケットで土を掘削するほかにアームが適当な回転してバケットに土が一杯になる掘削方法である。掘削手順は（a）方法と逆である。すなわ

ち，上から下まで順次に掘削する。こうすれば最初掘削した上土は下へすべる。

(c) 図7-13cには最大掘削深さ t_{max} 所で土を掘削する方法である。このような掘削方法は斜面上のくずれた土がバケットに充填する。

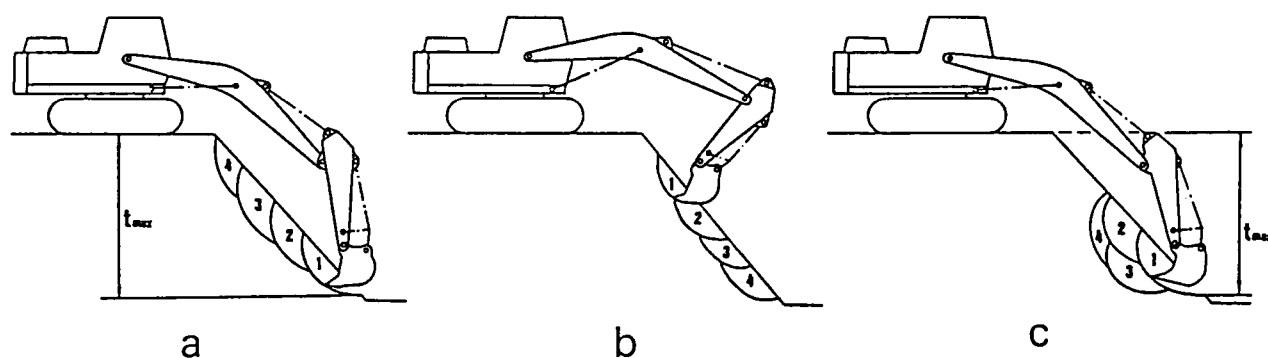


図7-13 掘削方法

表7-1 掘削実験結果比較表

計 測 内 容	掘 削 方 法			
	バケットで			アームで
	a	b	c	
バケット容積率	1.0 ~ 1.1	0.95	0.85	1.1 ~ 1.15
掘削時間 (sec)	3.9	3.75	4.6	7.0
掘削仕事 (A_K)(ton·m)	10.1	11.8	13.1	17.6
油圧ポンプ仕事 (A_H)(ton·m)	13.8	16.1	18.0	28.0
掘削時の効率 ($\eta = A_K / A_H$)	0.73	0.73	0.73	0.63
掘削エネルギー (tf·m/m ³)	18.2	24.0	29.0	33.6

7-4-2 三種類掘削方法の比較¹⁾²⁾

表7-1の結果から、三種類の掘削方法は異なる。この原因はまとめて2つである。

1つはバケットの形であり、もう1つは掘削方法の原因である。①バケットの形原因とは掘削中、バケット底部が土と触れあうことである。バケット底部が土と触れあうと、バケット回転中心（すなわち、アームとバケットとの接続点）が上向きの偏心運動が生ずる。そのため、ある程度土がバケットに入ることの影響する。実験により掘削方法aは掘削中、バケット回転中心の変位量が少ない。また、バケット底部が土の掘削軌跡とほぼ一致する。しかし、掘削方法bは掘削するとき、バケット回転中心が上向き移動する。故に、掘削方法bのバケット係数は掘削方法aのバケット係数より小さくようになる。②実験結果により検討すると、掘削方法aは掘削方法cとほぼ同様である。しかし、掘削エネルギーは掘削方法cが掘削方法aより大きい。その原因は掘削方法cのほうが掘削中、土のくずれる現象がないのためであろう。表7-1により、掘削方法aは掘削方法bより利点が多い。その理由は掘削方法aにより掘削した部分のすべり破壊が上の未掘削土に影響するために、未掘削土の内部の変形が生ずる。故に、ふたたび掘削するとき必要な掘削エネルギーが少なくなるのである。

以上述べたことをまとめると、①掘削方法aは最適掘削方法である。②アームで土を掘削するときのバケット係数がバケットで土を掘削するときのバケット係数より大きい、掘削時間が長い、必要な掘削エネルギーも大きい。実際作業の場合にはバケットで土を掘削する方法が一番よいのである。

7-5 結論

本章においては油圧ショベルの掘削力の新しい表現方法を提案した。また、アタッチメントを設計する前に各機構の主なパラメータの計算方法も究明した。さらに、油圧ショベルの作業効率を高めるために、合理的な掘削方法を究明した。以下、要点をまとめると、つぎのようになる。

(1) 油圧ショベルの真の性能を知るために、油圧ショベル掘削力の新しい表す方法を提案した。すなわち、掘削姿勢を決定する前提条件として制限条件により具体的な数字で掘削能力を示す。

(2) 土を掘削するとき、油圧システム最小エネルギーで掘削抵抗を克服するために、図 7-7 と計算式 (7-13) により、適当なバケットリンク機構伝動比を求めた。

(3) 掘削中掘削力が急に变化するときおよび排土中が制動するとき、アームとブームとの接続点に対して慣性力は少ないために、アーム前部長さ L_1 とアーム全長 L の比は 0.67 となることが最適値である。

(4) 掘削中、掘削力を十分発揮するおよび持上げ能力を高めるために、ブーム機構の最適値は次のとおりである (図 7-11 参照)。

$$h/r = 0.7 \sim 0.71 \quad r/l_0 = 0.4 \sim 0.5$$

(5) 作業効率を高めるために、掘削作業中、バケットでの掘削方法が一番適当方法である。

参 考 文 献

- 1) 安国明：油圧パワーショベルの掘削に関する研究「建築技術科研情報」NO.3
pp, 21～ 23, 1981年
- 2) 安国明：油圧ショベル掘削時における運動解析，テラメカニックス，第 8号，
pp, 115～124, 1988年
- 3) Башкиро . В . А . выбор оптимальных параметров стрелоподъемного механизма с гидроприводом , строительные и дорожные машины No . 4 . 1982年 pp14～16
- 4) Тимошенко . В . К . расчет Рациональных параметров стрелоподъемного механизма гидравлического экскаватора . строительные и дорожные машины NO3 . 1986年 .
pp 18～20
- 5) Philipp Holzmann :Kinetostatik des Lösevorgangs bei hydraulischen Universalbaggern, Baumaschine , Bautechnik + B M T, 1978, NO11, pp, 571
～ 580

第8章 結 論

本論文は油圧ショベルを設計するにあたり，従来の仕事の主な内容としての「土」そのものを除いて，経験に頼んで処理している現状を土質力学観点からとりあげ，バケットでの土の掘削抵抗機構特性について解明し，油圧ショベルの機構および機構の最適の解析などを行ったものである。一連の研究では，「土」そのものを中心として研究を行った。以下，各章で得られた結果をまとめてその結論を述べる。

第2章においては，まず土の掘削過程に土の掘削パターンおよび掘削時刃面にかかる力について一般的に略述した。その後，主として本論文で対象とする掘削抵抗解析の方法について世界中主な国の研究者たちカリョウチェキン，ドンブロフスキー，リース，畑村および畠等についての従来の研究成果について整理し，実際に解析する適用性および利点，欠点について検討した。まとめて今まで土の掘削抵抗の解析方法は二つに大別できる。一つは土圧論的考え方で，他は実験的方法である。前者は刃面を壁面と考えて土質力学的土圧論のクーロン土圧論および受働土圧対数ラセン曲線法を用いる方法であり，後者は多数の実験をもとにして実験式を求める方法である。この2つ解析方法を比較検討して油圧ショベルに対して受働土圧論を用いる解析方法は問題点が多いことを指摘した。

第3章においては，土の掘削抵抗を解析するためには，現在一般に用いられている土のC， ϕ 法によることは，きわめて困難である。それにかえて，土の掘削抵抗値と正比例の関係を有する土の比掘削抵抗 R_s なる値を測定する方法について述べた。

この方法は現場の掘削作業地において，そのままの状態において極めて簡単に実験を行うことができるので，取扱いも便利であり，試料採取にともなう乱れが影響を及ぼすおそれがない。この比掘削抵抗 R_s は，測定時の土中深さまでの土の総合的平均破壊強度をあらわすものであるから，土の状態により，測定深さを変えたと， R_s が変化することが多い。従って種々の測定深さに対する R_s の値を求めておき，実際の掘削深さにおける R_s の値を用いるのである。

次に，比掘削抵抗 R_s と土の力学定数および土質調査とするコーン試験，ベーン試験との関係について実験的研究を行った。その関係は次のとおりである。

1) 乾燥密度 ρ_d が増せば比掘削抵抗 R_s も増加する。その増加傾向は非線形的である。両者の間に、つぎの関係が成立した。

$$R_s = A \rho_d^B$$

ここに； A ， B は定数である。そのうち，砂質土の場合は $A = 7.55$ ， $B = 5.02$ で，シルトの場合は $A = 1.89$ ， $B = 5.45$ ，で，粘性土の場合は $A = 3.76$ ， $B = 7.59$ である。

2) 実験結果によって比掘削抵抗 R_s はコーン指数 q_c との間に直線関係がある。その関係は次の実験式が成立した。

$$R_s = C q_c$$

ここに； C は定数である。シルトの場合は $C = 0.00653$ ，粘性土の場合は $C = 0.00908$ である。

3) 比掘削抵抗 R_s とベーンせん断強度 C_u との関係は直線になる。すなわち，

$$R_s = k_1 C_u$$

ここに； k_1 は定数である。シルトの場合は $k_1 = 0.0876$ で，粘性土の場合は $k_1 = 0.105$ である。

4) 比掘削抵抗 R_s と相対密度 D_r との関係は砂の場合には比例関係にありを計算

$$R = (D_{15}/D_{50})^2 (D_{50}/D_{85})$$

することにより， R_s の最大値を推定することができる。

第4章においては，新しく製作した油圧ショベルの掘削実験装置および計測システムについて説明を行った。この新しく製作した掘削実験装置は油圧ショベル自体の制限を全部除いて，バケットでの土の掘削実験内容をほとんどすべて包含するものである。故に，この実験装置は以下の機能がある。

1) 土の種類の違いによって，掘削抵抗の大きさ，その方向，着力点の位置を計測することができる。

2) 掘削条件（掘削角度，掘削深さ，掘削速度など）の違いによって，掘削抵抗の大きさ，その方向，着力点の位置を計測することができる。

3) 掘削装置条件（爪なし，爪あり，爪の本数など）の違いによって，掘削抵抗の大きさ，その方向，着力点の位置を計測することができる。

第5章においては，砂質土を用いて，掘削条件（掘削角度，掘削深さ，掘削速度）

の相違により，また，掘削装置（爪なし，爪あり，爪の本数）の相違によって，掘削中に生じる掘削抵抗の大きさ，その方向および着力点の位置を解明，把握するために掘削実験を行った。結果は次のことが明らかになった。

1) 掘削抵抗切線成分 F_t と掘削抵抗法線成分 F_n とは砂の場合はあまり関係がないことがわかった。

2) 掘削抵抗の切線成分 F_t は掘削深さ t との関係が砂質土では t^2 に比例する。

3) 掘削抵抗は掘削速度に無関係である。

4) 爪本数が変わっても掘削抵抗があまり変わらないことが認められた。一方，爪の有無の場合には掘削抵抗が変わる，その差は約 0.37 倍ぐらいである。

5) 爪形が変わっても掘削抵抗に影響しないことが認められた。

6) 掘削抵抗着力点の位置はバケット回転角によって変化しているが，変化しても刃先の付近にあることがわかった。

さらに，掘削中にバケットと砂との摩擦抵抗を把握するために，鋼板と砂との摩擦実験を行った。砂では $f = p \tan \delta$ (f ; 摩擦応力， p ; 圧力， $\tan \delta$; 摩擦係数) の関係がある。

さらに，砂質土の掘削抵抗を解析するため，掘削実験結果による実験値と理論計算による計算値を比較検討した，その結果は一致する。畠の理論が妥当であることがわかった。

最後に，掘削抵抗 F_t ，掘削仕事 A および掘削土量 1 m^3 当りの消費仕事 E によってバケットの形について考察した。掘削土量 1 m^3 当りの最小の消費仕事 E によってバケットパラメータを決めるわけである。土を掘削する時のバケット全回転角度 Φ が $85^\circ \sim 110^\circ$ 間および掘削半径 R とバケット幅 B の値の差が少ない方がよい。

第6章においては，粘性土を用いて，第5章と同じ実験内容を行った。その結果をまとめて次のことが明らかになった。

1) 掘削抵抗切線成分 F_t と掘削抵抗法線成分 F_n とはある程度の関係がある。すなわち，この2つ抵抗の比 (F_n / F_t) はバケット回転角によって異なるが，ほぼ $0 \sim 0.35$ の関係になる。

2) 掘削抵抗の切線成分 F_t は掘削深さ t との関係は粘性土では直線的である。

3) バケットにつける爪本数が変わると掘削抵抗も変わる。その変化率は爪のすき間による変化している。一方、爪なしの場合の掘削抵抗は爪のある(5本)場合の掘削抵抗より大きい。その差は約 0.3倍になった。

4) 粘性土では爪形が変わると掘削抵抗も変化することがわかった。さらに、合理的な爪形が認められた。

5) 掘削抵抗着力点の位置はバケット回転角によって変化しているが、変化しても刃先の付近にあることがわかった。

さらに、掘削中にバケットと粘性土との摩擦抵抗を把握するために、鋼板と粘性土との摩擦実験を行った。粘性土では $f = k + p \tan \delta$ (f ; 摩擦応力, k ; 付着力, p ; 圧力, $\tan \delta$; 摩擦係数) の関係がある。

さらに、粘性土の掘削抵抗を解析するため、掘削実験結果による実験値と理論計算による計算値を比較検討した、その結果は一致し、畠の理論が妥当であることが明らかになった。

最後に、掘削抵抗 F_t 、掘削仕事 A および掘削土量 1 m^3 当りの消費仕事 E によってバケットの形について考察した。掘削土量 1 m^3 当りの最小の消費仕事 E によってバケットパラメータを決めるわけである。故に、土を掘削する時のバケット回転角 θ が $85^\circ \sim 110^\circ$ 間および掘削半径 R とバケット幅 B の値の差が少ない方がよい。

第7章においては、油圧ショベル掘削時における運動機構解析について研究を行った。従来の油圧ショベルの掘削力を表わす方法の問題点について述べて、また、かえて、油圧ショベル掘削力を表わす新しい方法を提案した。さらに、油圧ショベルアタッチメントを設計するにあたり、従来の経験計算方法などを除いて、作業範囲とブーム、アーム、バケットの相互寸法および力学から考えて各機構寸法および最適リンク機構寸法の新しい計算方法を提案した。この提案した新しい計算方法によって、最適リンク機構に対するいくつかの関係が得られた。

1) バケットで土を掘削する時、バケットシリンダ最小力で掘削抵抗を克服するために、両者間の適当伝動比を求める時、図7-7と計算式(7-13)によって求めることができる。

2) 掘削中掘削力が急に変化するときおよび排土中に制動がかかったとき、アーム

とブームとの接続点に対して作用する慣性力を少なくするために、アーム前部長さとアーム全長 L （図7-8参照）の比は0.67になるのが最適である。

3) 掘削中、掘削力を十分発揮し、また持上げ能力を高めるために、ブーム機構の最適値は次のとおりである（図7-11参照）。

$$h/r = 0.7 \sim 0.71 \quad r/l_0 = 0.4 \sim 0.5$$

最後に、油圧ショベルの作業効率を高めるために、合理的な掘削方法を提案した。

以上、本論文においては、まず、土の比掘削抵抗 R_s と土の力学定数およびコーン実験、ベーン実験との関係を明らかにした。 R_s を用いることによって切線抵抗 F_t と掘削抵抗法線成分 F_n を式(5-1)，(5-2)，と式(6-1)，(6-2)によって計算することができることを明らかにした。また、掘削土量 1 m^3 当りの最小の消費仕事 E によってバケットパラメータを決めるわけである。掘削抵抗を決める上に、第7章に述べた各リング最適値によって油圧ショベルアタッチメントを設計する、さらに、掘削能率を高めるために合理的な掘削方法を提案した。この一連の研究で従来の土性を無視した設計法をあらためて油圧ショベルの最適設計方法を決めた。これをまとめて、図8-2に示す。

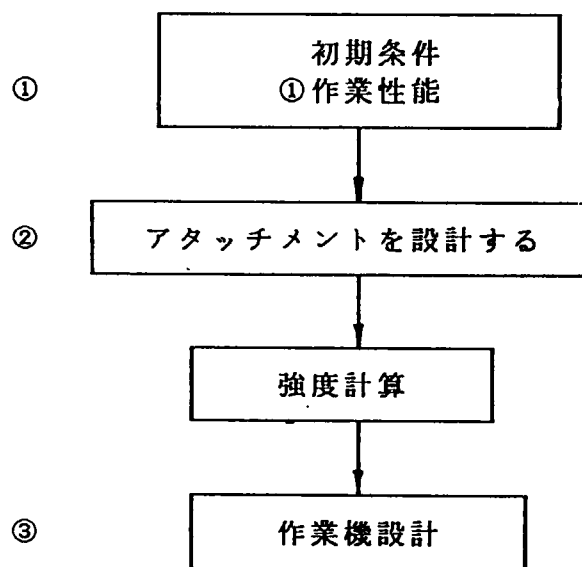


図8-1 従来の油圧ショベル設計法

図 8 - 1 は、従来の油圧シヨベル設計の手順を示したものである。

① 仕事の主な内容「土」そのものを除いて、作業性能だけを考えている。

② アタッチメントを設計する時、経験に頼んで処理している。

③ 良い性能の油圧シヨベルを設計することができないだろう。

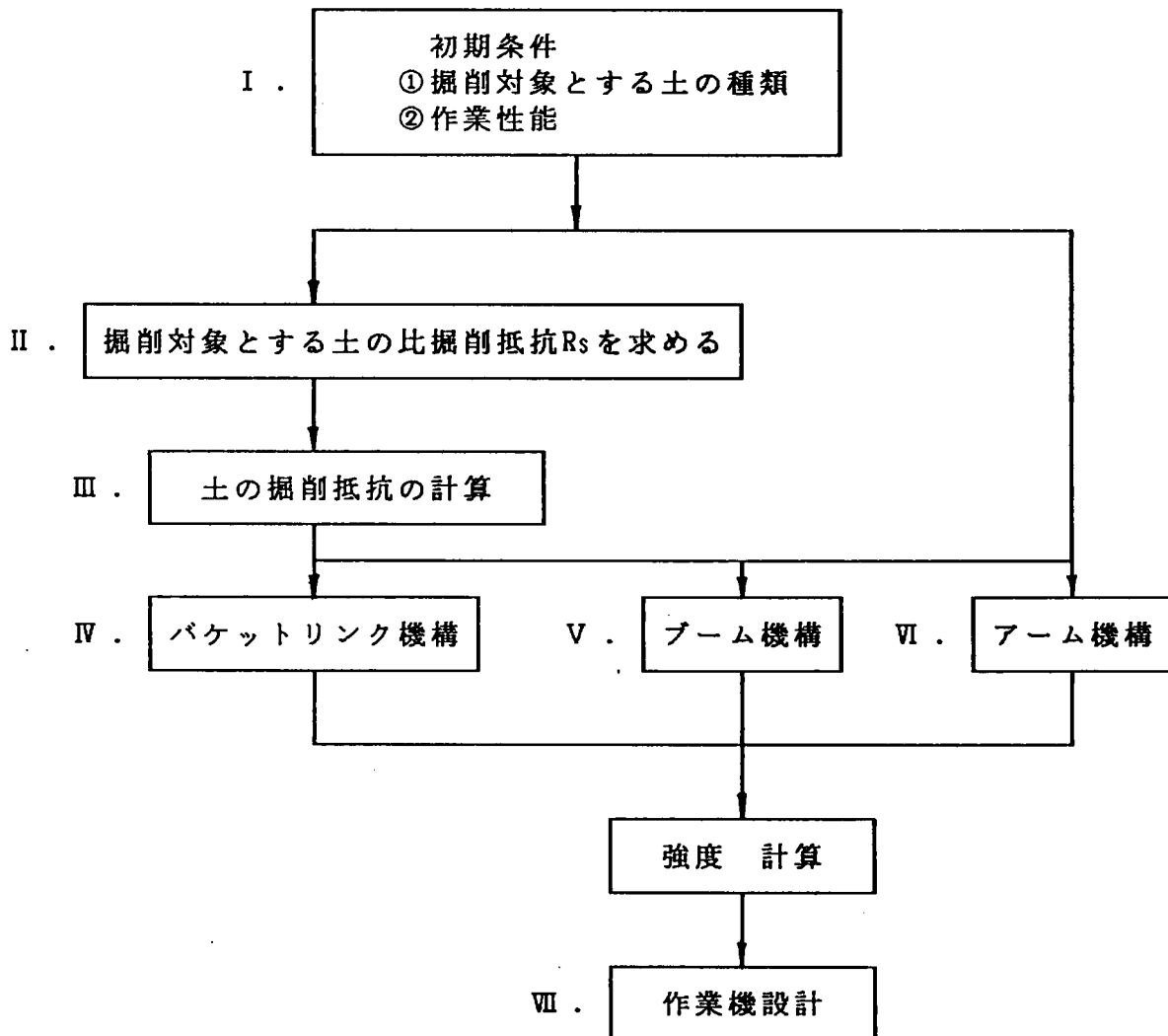


図 8 - 2 油圧シヨベルの最適設計法

図 8 - 2 は今回提案した油圧シヨベルの最適設計の手順を示したものである。今回得られた結果をまとめると、以下のようになる。

I . 油圧シヨベルを設計するにあたり、必ず次の事を調べなければならない。

①油圧シヨベルの主な仕事の内容。例えば、掘削土の種類と掘削作業種別、工事規模など。

②仕事の主な内容により油圧シヨベル作業性能が決まる。例えば、最大掘削深さ、最大掘削半径、最大ダンプ高さなど。

Ⅱ．掘削対象とする土が決定されたならば、第3章の「比掘削抵抗 R_s と土の力学定数との関係」を利用する。すなわち、土の種類により、土の乾燥密度 ρ_d 、粒度分布あるいはコーン指数などから土の比掘削抵抗 R_s を推定する。

Ⅲ．土の比掘削抵抗 R_s が推定されたならば、第5、6章の実験結果および掘削抵抗の解析方法に従って、バケットでの土の掘削抵抗を求める。その目的は、油圧シヨベルの適正な掘削能力を決定し、バケットの最適形状も決定する。

Ⅳ．土の掘削抵抗が算定されれば、第7章の図7-7により、バケット各リンク長さが決められる。したがって、適当な伝動比も決められる。土の掘削抵抗により、バケットシリンダの直径およびストロークなども決められる。故に、バケットでの土の掘削能力が決定される。これにより、油圧システムの能力、およびエンジンの馬力も決められる。

Ⅴ．第7章の「アーム機構」に従って、アーム寸法を決定する。さらに、掘削抵抗により、制限条件を考えて、アームシリンダの直径およびストロークなどが決められる。

Ⅵ．第7章の「ブーム機構」に従って、ブーム寸法を決定する。さらに、掘削抵抗により、制限条件を考えて、ブームシリンダを決定する。

Ⅶ．以上の決定にもとづき、性能の良い油圧シヨベルを設計、製作する。

以上が、本研究において提案した油圧シヨベルの最適設計の考え方である。

本研究の結果が実際の業務に役立になれば、この上ない喜びである。

謝 辞

本論文は、著者が京都大学大学院博士課程で行った一連の研究成果を取りまとめたものであります。このように学位申請論文としてまとめることができるまでには、多くの素晴らしい先生、先輩、友人と知合い皆様の御指導、御援助と御助力をいただきました。

著者は当初研究生として日本に来る前に、中国において京都大学工学部畠昭治郎教授の名前を知りました。そして、先生の論文を拝読しました。その時、私は先生の門下生になろうと決心しました。京都大学に入って、畠先生には著者の指導教授として終始、心暖かな御指導、御鞭撻を賜ったばかりでなく、著者の生活面においてもいろいろお世話いただきました。この3年間、畠昭治郎先生には実験や理論の手ほどきから研究の進め方に至るまで、懇切丁寧に教えていただきました。そして、畠先生の奥様にはいつも『体に気をつけて下さい』と言ってくださった暖かい言葉が、いつまでも著者の心にのこっています。

京都大学工学部助教授、工学博士谷本親伯先生にはいろいろと教えていただきました。京都大学工学部助手、工学博士建山和由先生には平素からいろいろ貴重な御教示をいただき、数々の世話を受けました。建山先生の堅実な研究姿勢は、著者にとってなかなか真似のできないものです。金沢大学工学部助手、工学博士飯塚敦先生にはいつも『何か手伝うことがあれば言ってください』と言ってもらえたことが何よりの喜びです。京都大学工学部檜垣義雄技官には、実験装置の作り方を教えていただきました。そして、実験では常に熱心な御助力をいただきました。

中国ハルビン建築工程学院講師趙偉民先生が留学中には、実験装置の製作から実験まで御助力をいただいたことが、今でも心に残っています。留学中の中国重慶建築工程学院講師白捷先生には本論文を作成するにあたって全文をワープロ入力していただきました。この御助力は本論文を作成する上でたいへんな助けとなりました。著者にとって非常に幸運です。

この他にも、土木施工学研究室の皆様を始め、本当に数多くの方々の御援助をいただきました。ここに記して深く感謝の意を表します。ありがとうございました。

$q = 0.018 \text{ m}^3$ 油圧ショベルバケット主なパラメータ計算表 (砂)

付表 1

R (m)	計算値	B (m)								
		0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
0.70	Φ	65.3	67.0	68.9	71.0	73.5	76.3	79.5	83.4	88.1
	t	0.111	0.116	0.123	0.131	0.139	0.150	0.162	0.178	0.197
	F _t	90.13	91.40	94.86	97.13	100.95	105.81	109.43	115.10	121.70
	A	71.89	74.80	79.83	84.24	90.64	98.61	106.27	117.26	130.93
	E	3993.96	4155.67	4435.25	4680.00	5035.30	5478.44	5903.66	6514.46	7273.89
0.65	Φ	68.7	70.6	72.6	74.8	77.4	80.4	83.8	88.0	93.0
	t	0.114	0.120	0.126	0.134	0.143	0.154	0.166	0.182	0.203
	F _t	94.07	97.81	99.54	103.20	106.85	109.35	115.19	121.15	129.19
	A	73.30	78.33	81.97	87.56	93.81	99.72	109.48	120.93	136.28
	E	4072.24	4351.44	4553.88	4864.37	5211.37	5540.12	6082.37	6718.09	7570.92
0.60	Φ	72.8	74.7	76.8	78.9	82.0	85.2	88.8	93.3	98.7
	t	0.117	0.123	0.130	0.137	0.147	0.158	0.171	0.188	0.209
	F _t	100.31	102.76	105.96	107.88	112.91	117.39	122.23	129.27	136.94
	A	76.46	80.37	85.21	89.12	96.94	104.72	113.64	126.28	141.51
	E	4247.5	4465.14	4733.58	4950.75	5385.29	5817.77	6313.29	7015.46	7861.79
0.55	Φ	77.4	79.2	81.8	84.3	87.2	90.6	94.7	99.4	105.3
	t	0.121	0.126	0.134	0.142	0.152	0.163	0.177	0.194	0.216
	F _t	106.75	107.84	112.58	115.89	120.72	124.94	130.96	137.65	146.27
	A	79.30	81.97	88.39	93.77	101.03	108.64	119.02	131.32	147.82
	E	4405.49	4553.88	4910.39	5209.17	5612.75	6035.56	6612.39	7295.58	8212.19
0.50	Φ	82.8	85.0	87.5	90.4	93.5	97.2	101.5	106.8	113.2
	t	0.125	0.131	0.139	0.148	0.157	0.169	0.184	0.202	0.225
	F _t	114.12	116.57	121.14	125.89	128.79	134.31	141.52	149.24	158.71
	A	82.44	86.45	92.49	99.30	105.07	113.90	125.33	139.07	156.75
	E	4580.00	4802.78	5138.05	5516.67	5837.01	6327.93	6962.59	7725.94	8708.47
0.45	Φ	88.9	91.8	94.5	97.5	101.0	105.1	109.9	115.7	122.8
	t	0.129	0.137	0.146	0.153	0.164	0.176	0.192	0.211	0.235
	F _t	121.35	127.49	131.83	134.54	140.53	145.67	154.09	162.84	173.13
	A	84.71	91.90	97.82	103.01	111.46	120.22	132.98	147.94	166.95
	E	4706.27	5105.62	5434.64	5722.71	6192.00	6678.71	7387.75	8218.98	9274.83
0.40	Φ	97.4	100.0	103.1	106.5	110.4	115.0	120.4	126.9	135.1
	t	0.136	0.143	0.151	0.161	0.172	0.185	0.201	0.221	0.247
	F _t	135.30	138.90	142.96	148.98	154.58	160.94	168.88	178.64	191.26
	A	91.98	96.95	102.88	110.75	119.12	129.19	141.92	158.23	180.36
	E	5110.15	5386.23	5715.62	6152.63	6617.52	7177.03	7884.57	8790.50	10020.05
0.35	Φ	107.6	110.6	114.0	118.0	122.5	127.7	133.9	141.5	151.2
	t	0.144	0.151	0.159	0.170	0.182	0.196	0.213	0.235	0.263
	F _t	150.21	154.88	158.51	166.1	173.07	180.65	189.64	202.00	216.85
	A	98.71	104.62	110.37	119.71	129.49	140.90	155.09	174.56	200.25
	E	5484.06	5812.62	6131.37	6650.32	7193.76	7827.50	8616.03	9697.67	11124.79
0.30	Φ	121.2	124.7	128.8	133.4	138.8	145.0	152.6	161.9	174.1
	t	0.153	0.161	0.170	0.181	0.195	0.210	0.229	0.253	0.285
	F _t	170.57	176.07	181.20	188.29	198.68	207.38	219.20	234.11	254.64
	A	108.22	114.94	122.18	131.50	144.37	157.42	175.11	198.42	232.08
	E	6012.28	6385.46	6787.75	7305.27	8020.27	8745.40	9728.50	11023.42	12893.48

R : 掘削半径 (m)
 B : 掘削幅 (m)
 Φ : 土を掘削する時のバケット回転角 (deg)
 t : 最大掘削深さ (m)
 F_t : 最大リ線抵抗 (kgf)
 A : 掘削仕事 (kgf・m)
 E : 掘削 1 m³ 当りの消費仕事 (kgf・m/m³)

$q = 0.018 \text{ m}^3$ 油圧ショベルバケット主なパラメータ計算表 (粘性土)

付表2

R (m)	計算値	B (m)								
		0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
0.70	Φ	65.3	67.0	68.9	71.0	73.5	76.3	79.5	83.4	88.1
	t	0.111	0.116	0.123	0.131	0.139	0.150	0.162	0.178	0.197
	F_t	228.0	221.2	216.5	211.4	203.9	198.1	190.1	182.9	173.4
	A	181.8	181.1	182.2	183.3	183.1	184.6	182.9	186.2	186.6
	E	10102.0	10058.0	10124.0	10185.0	10171.0	10254.0	10257.0	10345.0	10367.0
0.65	Φ	68.7	70.6	72.6	74.8	77.4	80.4	83.8	88.0	93.0
	t	0.114	0.120	0.126	0.134	0.143	0.154	0.166	0.182	0.203
	F_t	234.0	228.9	221.8	216.2	210.0	203.3	194.8	187.0	178.7
	A	182.4	183.3	182.7	183.5	184.2	185.4	185.2	186.6	188.5
	E	10136.0	10181.0	10150.0	10192.0	10232.0	10300.0	10288.0	10364.0	10471.0
0.60	Φ	72.8	74.7	76.8	78.9	82.0	85.2	88.8	93.3	98.7
	t	0.117	0.123	0.130	0.137	0.147	0.158	0.171	0.188	0.209
	F_t	240.3	234.6	228.9	221.1	215.7	208.6	200.7	193.1	182.2
	A	183.2	183.5	184.0	182.6	185.2	186.1	186.6	188.6	188.3
	E	10175.0	10192.0	10223.0	10146.0	10286.0	10338.0	10366.0	10477.0	10460.0
0.55	Φ	77.4	79.2	81.8	84.3	87.2	90.6	94.7	99.4	105.3
	t	0.121	0.126	0.134	0.142	0.152	0.163	0.177	0.194	0.216
	F_t	248.5	240.3	235.9	229.2	223.0	215.2	207.7	199.2	190.1
	A	184.6	182.7	185.2	185.5	186.6	187.1	188.8	190.1	192.2
	E	10256.0	10147.0	10289.0	10302.0	10368.0	10396.0	10489.0	10558.5	10675.0
0.50	Φ	82.8	85.0	87.5	90.4	93.5	97.2	101.5	106.8	113.2
	t	0.125	0.131	0.139	0.148	0.157	0.169	0.184	0.202	0.225
	F_t	256.7	249.8	244.7	238.8	230.3	223.1	215.9	207.4	198.1
	A	185.5	185.3	186.8	188.4	187.9	189.2	191.2	193.3	195.6
	E	10304.0	10293.0	10378.0	10464.0	10438.0	10513.0	10624.0	10739.0	10867.0
0.45	Φ	88.9	91.8	94.5	97.5	101.0	105.1	109.9	115.7	122.8
	t	0.129	0.137	0.146	0.153	0.164	0.176	0.192	0.211	0.235
	F_t	265.0	261.3	257.0	246.9	241.0	232.4	225.3	216.7	206.9
	A	185.0	188.3	190.7	189.0	190.8	192.0	194.5	196.9	199.5
	E	10275.0	10463.0	10596.0	10502.0	10601.0	10654.0	10803.0	10937.0	11081.0
0.40	Φ	97.4	100.0	103.1	106.5	110.4	115.0	120.4	126.9	135.1
	t	0.136	0.143	0.151	0.161	0.172	0.185	0.201	0.221	0.247
	F_t	279.3	273.0	265.8	260.0	252.3	244.3	235.9	226.9	217.4
	A	189.9	190.4	191.3	193.0	194.4	196.1	198.2	210.0	205.0
	E	10550.0	10575.0	10628.0	10730.0	10802.0	10892.0	11014.0	11168.0	11390.0
0.35	Φ	107.6	110.6	114.0	118.0	122.5	127.7	133.9	141.5	151.2
	t	0.144	0.151	0.159	0.170	0.182	0.196	0.213	0.235	0.263
	F_t	295.8	288.0	279.9	274.0	267.0	258.8	250.0	241.3	232.0
	A	194.4	194.5	194.9	198.0	200.0	201.9	204.4	208.6	214.0
	E	10798.0	10807.0	10827.0	10984.0	11098.0	11213.0	11357.0	11586.0	11876.0
0.30	Φ	121.2	124.7	128.8	133.4	138.8	145.0	152.6	161.9	174.1
	t	0.153	0.161	0.170	0.181	0.195	0.210	0.229	0.253	0.285
	F_t	314.2	307.0	299.3	292.1	286.1	277.3	268.8	259.8	250.9
	A	199.4	200.4	201.8	204.0	207.9	210.5	214.7	220.2	228.6
	E	11075.0	11136.0	11210.0	11332.0	11548.0	11692.0	11928.0	12233.0	12702.0

R : 掘削半径 (m)
 B : 掘削幅 (m)
 Φ : 土を掘削する時のバケット回転角 (deg)
 t : 最大掘削深さ (m)
 F_t : 最大切線抵抗 (kgf)
 A : 掘削仕事 (kgf・m)
 E : 掘削1 m^3 当りの消費仕事 (kgf・m/ m^3)